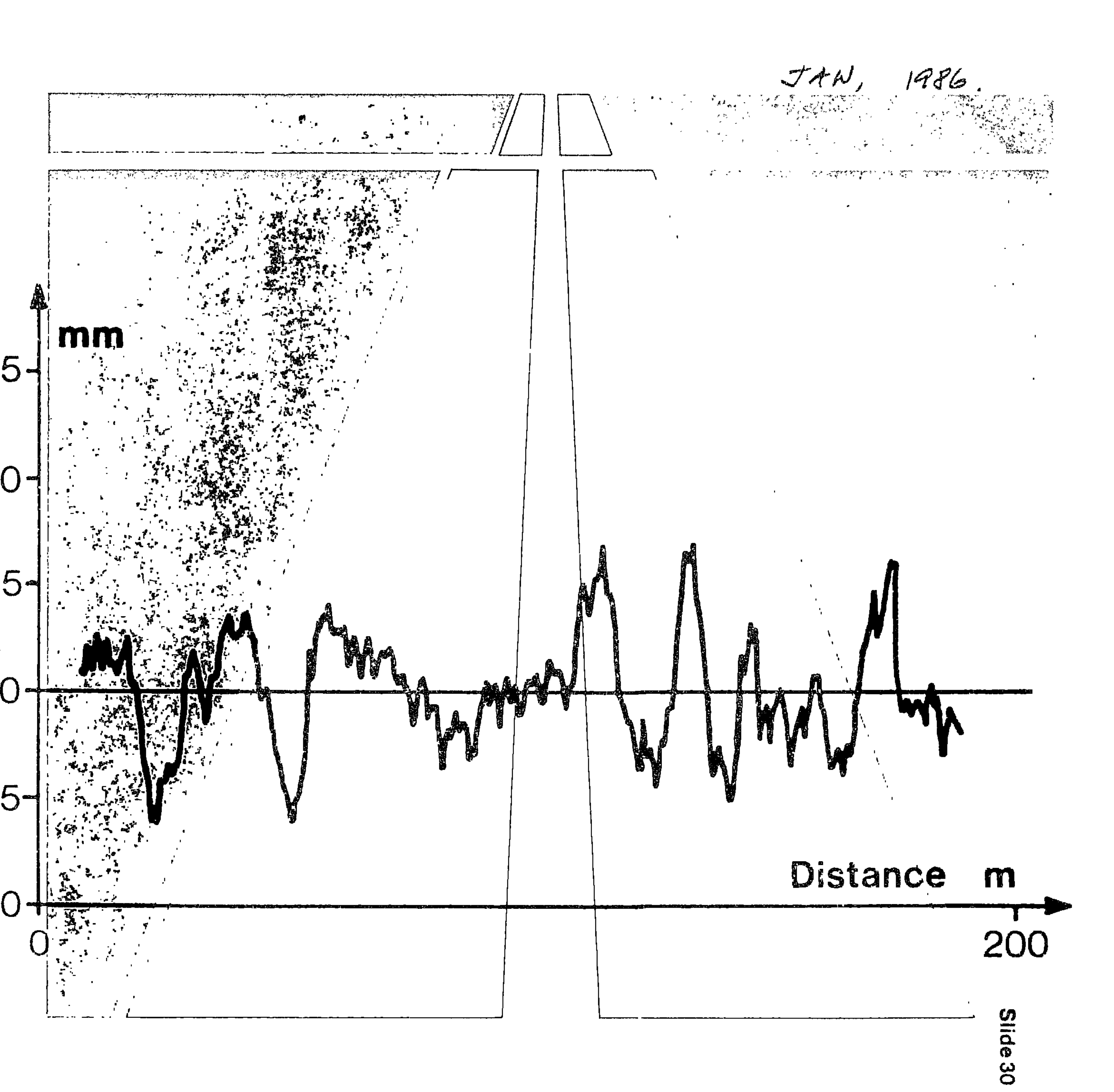
LUTP00 46F

Directives pour la mesure de l'uni des routes et l'étalonnage des appareils

Michael W. Sayers, Thomas D. Gillespie, and William D.O. Paterson

JAN, 1986.



RECENT WORLD BANK TECHNICAL PAPERS

No. 1 *Increasing Agricultural Productivity*

No. 2 *A Model for the Development of a Self-Help Water Supply Program*

No. 3 *Ventilated Improved Pit Latrines: Recent Developments in Zimbabwe*

No. 4 *The African Trypanosomiases: Methods and Concepts of Control and Eradication in Relation to Development*

No. 5 *Structural Changes in World Industry: A Quantitative Analysis of Recent Developments*

No. 6 *Laboratory Evaluation of Hand-Operated Water Pumps for Use in Developing Countries*

No. 7 *Notes on the Design and Operation of Waste Stabilization Ponds in Warm Climates of Developing Countries*

No. 8 *Institution Building for Traffic Management*

No. 9 *Meeting the Needs of the Poor for Water Supply and Waste Disposal*

No. 10 *Appraising Poultry Enterprises for Profitability: A Manual for Investors*

No. 11 *Opportunities for Biological Control of Agricultural Pests in Developing Countries*

No. 12 *Water Supply and Sanitation Project Preparation Handbook: Guidelines* (also in Spanish, 12S)

No. 13 *Water Supply and Sanitation Project Preparation Handbook: Case Studies* (also in Spanish, 13S)

N0. 14 *Water Supply and Sanitation Project Preparation Handbook: Case Study* (also in Spanish, 14S)

No. 15 *Sheep and Goats in Developing Countries: Their Present and Potential Role*

No. 16 *Managing Elephant Depredation in Agricultural and Forestry Projects*

No. 17 *Energy Efficiency and Fuel Substitution in the Cement Industry with Emphasis on Developing Countries*

No. 18 *Urban Sanitation Planning Manual Based on the Jakarta Case Study*

No. 19 *Laboratory Testing of Handpumps for Developing Countries: Final Technical Report*

No. 20 *Water Quality in Hydroelectric Projects: Considerations for Planning in Tropical Forest Regions*

No. 21 *Industrial Restructuring: Issues and Experiences in Selected Developed Economies*

No. 22 *Energy Efficiency in the Steel Industry with Emphasis on Developing Countries*

No. 23 *The Twinning of Institutions: Its Use as a Technical Assistance Delivery System*

No. 24 *World Sulphur Survey*

No. 25 *Industrialization in Sub-Saharan Africa: Strategies and Performance* (also in French, 25F)

No. 26 *Small Enterprise Development: Economic Issues from African Experience* (also in French, 26F)

No. 27 *Farming Systems in Africa: The Great Lakes Highlands of Zaire, Rwanda, and Burundi* (also in French, 27F)

No. 28 *Technical Assistance and Aid Agency Staff: Alternative Techniques for Greater Effectiveness*

No. 29 *Handpumps Testing and Development: Progress Report on Field and Laboratory Testing*

(List continues on the inside back cover)

DOCUMENT TECHNIQUE DE LA BANQUE MONDIALE NUMERO 46F

Directives pour la mesure de l'uni des routes et l'étalonnage des appareils

Michael W. Sayers, Thomas D. Gillespie, and William D.O. Paterson

Banque mondiale
Washington, D.C.

Imprimé aux Etats-Unis d'Amérique
Première impression juin 1990

Les *documents techniques* sont publiés pour diffuser dans les meilleurs délais les résultats des recherches de la Banque dans les milieux du développement. C'est pourquoi le texte dactylographié de ce document n'a pas été préparé selon les méthodes appliquées aux textes imprimés officiels. La Banque mondiale ne s'estime pas responsable des erreurs qui pourraient s'y trouver.

Les observations, interprétations et conclusions exprimées dans ce document n'engagent que leur(s) auteur(s) et ne sauraient être attribuées à la Banque mondiale, à ses institutions affiliées, à des membres du Conseil des Administrateurs ni aux pays qu'ils représentent. La Banque mondiale ne garantit pas l'exactitude des données présentées dans cette publication et décline toute responsabilité quant aux conséquences qui pourraient résulter de leur emploi. Les cartes qui accompagnent le texte sont uniquement destinées à en faciliter la lecture; les appellations et les signes qu'elles contiennent n'impliquent de la part de la Banque mondiale, de ses institutions affiliées, du Conseil des Administrateurs ni de ses pays membres aucun jugement quant au statut juridique d'un pays, d'un territoire, d'une ville, d'une région ou de ses autorités, ni quant à ses frontières ou à son appartenance territoriale.

La liste complète de toutes les publications de la Banque mondiale figure dans *Index of Publications*, qui paraît tous les ans et contient la liste des titres par ordre alphabétique (accompagnée des renseignements nécessaires à la commande) et des index par sujet, par auteur et par pays et région. La dernière édition peut être obtenue gratuitement auprès du Publications Sales Unit, Department F, The World Bank, 1818 H Street, N.W., Washington, D.C. 20433, Etats-Unis, ou de Publications, Banque mondiale, 66, avenue d'Iéna, 75116 Paris, France.

ISSN : 0253-7494
ISBN : 0-8213-1618-4

Michael W. Sayers est adjoint de recherche et Thomas D. Gillespie est chercheur à l'Institut de recherche sur les transports de l'université du Michigan à Ann Arbor. William D.O. Paterson est ingénieur principal des routes au département des transports de la Banque mondiale.

La Bibliothèque du Congrès des Etats-Unis a catalogué l'édition anglaise comme suit :

Sayers, M.W. (Michael W.)
Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements.

(World Bank technical paper, ISSN 0253-7494 ; no. 46)
Bibliography: p.
1. Roads—Riding qualities—Testing. 2. Road meters—Calibration. I. Gillespie, T.D. (Thomas D.) II. Paterson, William D.O. III. Title. IV. Series.
TE251.5.S29 1986 625.8 85-17806
ISBN 0-8213-0590-5

RESUME

Les défauts d'uni prennent de plus en plus d'importance comme indicateur de l'état des routes et servent aussi bien de critère de performance des chaussées que de facteur déterminant principal des coûts pour les usagers. Le besoin de mesurer l'uni a fait apparaître sur le marché une multitude d'instruments qui vont de dispositifs relativement simples aux systèmes les plus complexes. Les difficultés se situent au niveau de la corrélation et de la transposabilité des mesures effectuées avec des instruments différents et de l'étalonnage par rapport à une échelle commune. Ces difficultés sont encore exarcerbées par le grand nombre de facteurs responsables de divergences entre les lectures d'instruments similaires, et même entre celles d'un même instrument. De ce besoin de corrélation et d'étalonnage est née l'Expérience internationale sur les défauts d'uni des routes (International Road Roughness Experiment ou IRRE) qui a eu lieu en 1982 au Brésil et dont il est rendu compte dans un autre numéro de la présente série intitulé The International Road Roughness Experiment : Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements (Expérience internationale sur les défauts d'uni des routes : établissement de corrélations et d'une norme d'étalonnage des mesures - Publication technique N° 45 de la Banque mondiale).

Le présent ouvrage classe les systèmes de mesure des défauts d'uni des routes en quatre groupes hiérarchisés qui vont des méthodes de mesure du profil (2 groupes) - qui sont précises et se prêtent au plus haut point aux analyses détaillées - jusqu'aux méthodes subjectives qui permettent des évaluations sans instrument, en passant par les appareils de type-réponse qui sont les instruments les plus répandus, les plus pratiques et les plus rapides. Les grandes lignes de la planification des programmes de mesure des défauts d'uni des routes y sont esquissées, ainsi que les critères permettant de choisir un système de mesure capable d'atteindre les objectifs fixés. L'ouvrage explique également les procédés de relevé à l'aide de systèmes et de méthodes de mesure appartenant aux quatre groupes préalablement définis, donne les caractéristiques des instruments, montre la nécessité de vérifications et de contrôles suffisants et l'importance de la vitesse utilisée et expose les méthodes d'analyse des données.

On trouvera aussi une définition de l'Indice international des défauts d'uni des routes (IRI ou International Roughness Index) et le programme permettant de le calculer. L'IRI repose sur la simulation des réponses aux défauts d'uni de la route d'une automobile circulant à 80 km/h, exprimée sous forme de pente moyenne rectifiée de référence, c'est-à-dire du quotient obtenu en divisant les mouvements accumulés de la suspension d'un véhicule, par la distance parcourue pendant l'essai. Le document explique aussi comment établir un rapport entre toutes les mesures, y compris celles faites à des vitesses inférieures à 80 km/h, et présente une échelle des défauts d'uni. L'IRI s'impose donc comme échelle pouvant être utilisée pour l'étalonnage aussi bien que pour les comparaisons.

REMERCIEMENTS

Du point de vue technique, les directives exposées dans le présent document sont fondées sur les conclusions publiées de deux importants programmes de recherche :

- L'expérience internationale sur les défauts d'uni des routes (IRRE) (1), qui a eu lieu à Brasilia en 1982 et a été financée par un grand nombre d'organismes, dont l'Organisation brésiliennee de planification des transports (GEIPOT), l'Institut brésilien des recherches routières (IPR/DNER), la Banque mondiale (BIRD), le Laboratoire central français des ponts et chaussées (LCPC), le Centre belge de recherches routières (CRR), et le Laboratoire britannique de recherche sur les transports et les routes (Transport and Road Research Laboratory ou TRRL);

- Le projet 1-18 du programme NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) consigné dans le Rapport numéro 228 (2).

Nous remercions Per Fossberg†, (BIRD) et Cesar Queiroz (IPR/DNER) de leur contribution au développement de ces méthodes. De même, nous adressons nos remerciements à Clell Harral (BIRD) qui est à l'origine de la conception de l'expérience IRRE, a obtenu la participation des différents orga concernés et fait rédiger les directives que l'on trouvera dans cet ouvrage.

La traduction de ce document a réalisée par la Banque mondiale sous la supervision de Per E. Fossberg, conseiller aux opérations routières, et de William D. O. Paterson, ingénieur (senior) des ponts et chaussées. Nous tenons à remercier Michel Boulet (LCPC), Michel Gorski (CRR) et Jean-Marie Lantran (BIRD) qui ont accepté de réviser le traduction et d'en vérifier la terminologie.

AVANT-PROPOS

Dans cet ouvrage traduit de l'Anglais, la terminologie technique française adoptée est celle du Laboratoire central des ponts et chaussées.

Le sujet est la "mesure des défauts d'uni des routes", appelée également "mesure de l'uni des routes". Ces deux expressions sont équivalentes et sont employées indifféremment dans le texte.

Le sigle IRI (International Roughness Index) a été conservé dans ce document parce qu'il est d'utilisation universelle, y compris dans les pays francophones.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1

OBJET DE L'OUVRAGE

Cet ouvrage présente des directives destinées au personnel des organismes et entreprises de travaux publics chargés d'élaborer et de conduire des programmes de contrôle des défauts d'uni des routes. Il donne des règles générales sur :

* le choix d'une méthode de mesure des défauts d'uni des routes;
* l'étalonnage des appareils de mesure par rapport à une échelle standard des défauts d'uni;
* l'utilisation de techniques et de méthodes permettant d'obtenir des mesures fiables dans le cadre du service quotidien normal.

Les propositions et les méthodes présentées ici sont destinées à servir de guide pratique pour obtenir des données sur les défauts d'uni des routes, à partir desquelles on pourra créer une banque de données pour tout le réseau routier. Convenablement appliquées, ces directives doivent permettre :

* à l'aide des données sur les défauts d'uni, d'indiquer l'état de la route et ses effets sur les véhicules au point de vue du confort, du coût pour les usagers et de la sécurité,
* de comparer les données obtenues lors des mesures courantes à une échelle standard des défauts d'uni et d'identifier les données erronées avant de les introduire dans la banque de données,
* de comparer directement les données sur les défauts d'uni avec celles obtenues par d'autres organismes de génie civil observant les mêmes directives, et
* d'obtenir des mesures des défauts d'uni des routes ayant toujours la même signification sur tous les types de routes utilisées par les camions et les voitures de tourisme, notamment sur les routes en asphalte, les routes en béton, les chaussées traitées en surface et les chaussées en gravier ou en terre battue.

Les méthodes et procédés exposés dans cet ouvrage s'appliquent principalement à deux sortes de mesures des défauts d'uni :

* la mesure directe des défauts d'uni sur l'échelle standard, à partir du profil longitudinal de la route,
* l'évaluation de la mesure standard à l'aide des appareils de type-réponse.

CHAPITRE 2

PLANIFICATION D'UN PROJET DE MESURE D'UNI DES ROUTES

Pour concevoir un projet d'étude des défauts d'uni d'un réseau routier, il faut bien comprendre les objectifs que l'on veut atteindre. Il arrive qu'un projet particulier exige des investissements considérables en capital et en travail. Il y a donc avantage à concevoir ce projet avec soin. La conception en elle-même est une synthèse dans laquelle entrent en ligne de compte les buts, les ressources disponibles et l'environnement du projet. Le choix d'une méthode de mesure des défauts d'uni qui soit d'application facile, tout en étant suffisamment précise pour répondre aux buts du projet, en est peut-être l'élément le plus délicat. Le présent chapitre fait le point sur les différentes méthodes existantes, classées selon le caractère plus ou moins direct des mesures qu'elles permettent d'obtenir par rapport à une échelle standard (généralement, les méthodes les plus directes sont aussi les plus précises). De plus, on y trouvera un exposé des erreurs auxquelles on peut s'attendre et de leur importance en fonction de la nature des différents projets de mesure.

2.1 Généralités sur l'échelle IRI de l'uni des routes

Avant d'aborder les caractéristiques des mesures des défauts d'uni, ou les problèmes liés à la précision, il faut tout d'abord définir une échelle des défauts d'uni. Afin d'encourager l'utilisation d'un étalon commun pour tous les projets importants, dans le monde entier, on a choisi un "indice international des défauts d'uni des routes" (International Roughness Index ou IRI). Sa dénomination vient de ce qu'il a été élaboré lors de l'Expérience internationale sur les défauts d'uni des routes (International Road Roughness Experiment ou IRRE), menée par des équipes de chercheurs délégués par le Brésil, la Grande-Bretagne, la France, les Etats-Unis et la Belgique pour définir un indice de ce type. L'IRRE a eu lieu à Brasilia en 1982 (1) et a consisté en la mesure contrôlée de l'uni d'un grand nombre de routes dans diverses conditions, à l'aide d'une large gamme d'instruments et de procédés. L'échelle de mesure sélectionnée comme indice IRI a été celle qui a le mieux satisfait aux critères de stabilité dans le temps, de possibilité de transposition et d'applicabilité, tout en restant immédiatement mesurable par tous les utilisateurs.

L'indice IRI est une mesure de l'uni des routes standardisée, apparentée aux mesures obtenues à l'aide des appareils de type-réponse. Les unités recommandées sont : les mètres par kilomètres (m/km) = millimètres par mètres (mm/m) = pente x 1000. On appelle la mesure obtenue par un appareil de type-réponse soit par son appellation technique de pente moyenne rectifiée (PMR) (Average rectified slope ou ARS), ou plus couramment, par les unités utilisées (mm/km, pouce/mille anglais, "inches/mile", "in/mi", etc.). La mesure PMR est un quotient obtenu en divisant le total des mouvements de la suspension d'un véhicule (mesurés en pouces, mm, etc.), par la distance parcourue par le véhicule pendant l'essai (milles, km, etc.). La référence de l'appareil de type-réponse utilisée pour l'indice IRI est plus un modèle mathématique qu'un système mécanique et existe en tant que procédure de calcul appliquée à un profil mesuré. On appelle ce procédé de calcul "simulation quart de voiture" (SQV) (quarter-car simulation) parce que le modèle mathématique représente un appareil de type-réponse à roue unique, comme par exemple la remorque à intégrateur de vibrations et le rugosimètre BPR. Lorsqu'elle est obtenue au moyen d'une simulation de référence, la mesure s'appelle une PMR de référence (PMRR). Ce type de mesure variant avec la vitesse du véhicule, la définition de l'indice IRI mentionne donc une vitesse standard de 80 km/h. Ainsi, la désignation plus technique de l'indice IRI est $PMRR_{80}$, qui indique une mesure de pente moyenne rectifiée (PMR) à partir d'un instrument de référence (R) à une vitesse de 80 km/h.

Le modèle mathématique utilisé pour définir l'indice IRI est semblable à celui décrit dans le rapport 228 du NCHRP daté de 1981 (2), avec la seule différence que l'indice IRI est calculé indépendamment pour chaque trace de roue (le modèle du rapport 228 du NCHRP a été calculé simultanément pour deux traces de roue, ce qui reproduit les performances d'un appareil de type-réponse basé sur la voiture de tourisme, ou la remorque à deux roues). La version IRI est plus transposable et on a démontré qu'elle offre exactement le même degré de précision avec tous les appareils de type-réponse que la version NCHRP.

Pour garantir la stabilité dans le temps, on définit l'indice IRI comme une caractéristique du profil en long d'une trace de roue parcourue et non pas comme une caractéristique d'un élément de l'équipement. Ainsi, pour mesurer directement l'indice IRI, il faut auparavant obtenir le profil de la trace de roue.

On a démontré que la caractéristique particulière du profil qui définit l'indice IRI est directement mesurable par la plupart des méthodes de mesure des profils (plus que toutes les autres mesures des défauts d'uni basées sur les profils envisagées lors de l'IRRE). En même temps, la compatibilité de la caractéristique du profil IRI avec les mesures obtenues par l'appareil de type-réponse est si élevée quelle permet un étalonnage par rapport à l'échelle IRI en vue d'obtenir la précision la meilleure possible (ou s'en approchant) avec ce genre d'instrument. L'indice IRI est aussi en corrélation étroite avec l'opinion subjective des usagers concernant l'uni des routes. Parce que l'indice IRI (1) est mesurable par un grand nombre de méthodes de mesure des profils, (2) qu'il est en étroite corrélation avec les mesures de l'appareil de type-réponse, et (3) qu'il est en étroite corrélation avec les avis subjectifs, il représente une échelle universelle.

La figure 1 montre l'amplitude de variation des défauts d'uni dans l'échelle de l'indice IRI, pour différents types de routes.

Il faut reconnaître que l'indice IRI est un bon indice pour résumer les propriétés de l'uni des routes qui influent sur les réactions des véhicules, mais qu'il peut ne pas être celui qui convient le mieux à d'autres applications. Plus précisément, l'indice IRI est utile pour obtenir une mesure de l'uni des routes qui se rapporte :

* aux coûts totaux de fonctionnement des véhicules,

* à la roulance dans son ensemble,

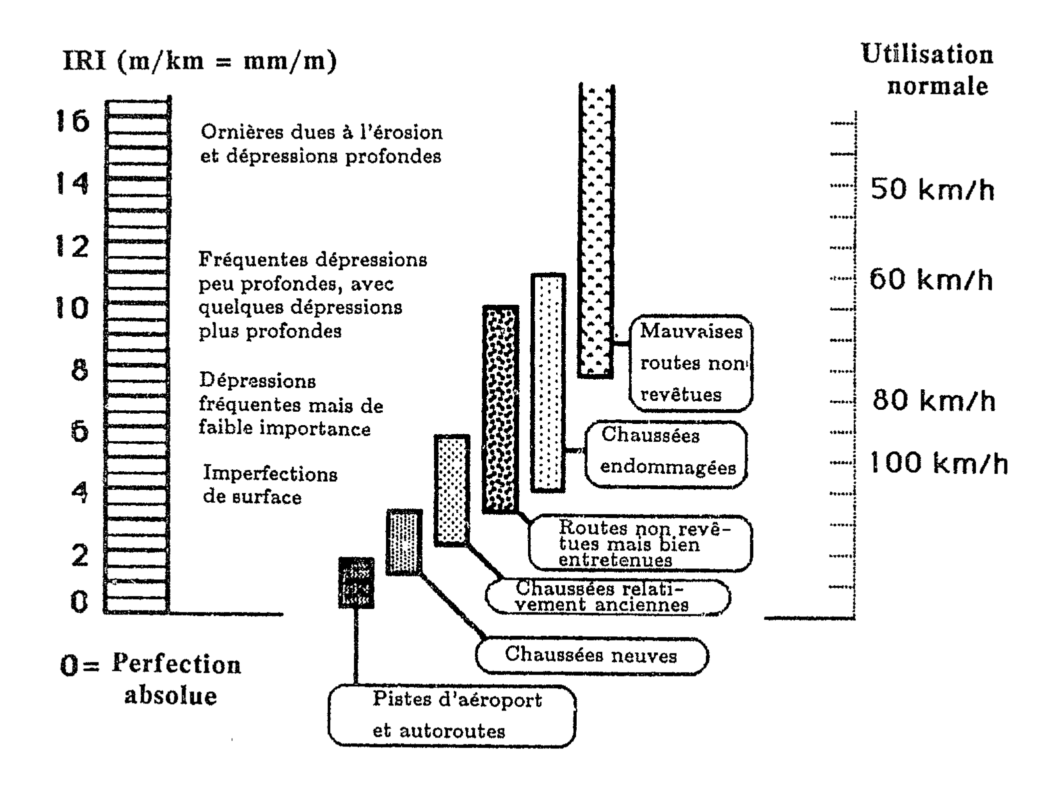
* aux charges dynamiques des roues (dégâts occasionnés à la route par les camions lourds; freinage et limites de sécurité des voitures de tourisme dans les virages),

* à l'état général des surfaces.

L'utilisation de l'indice IRI est également recommandée partout où le relevé des mesures doit se faire avec un appareil de type-réponse circulant à des vitesses courantes sur route (50 à 100 km/h), quelle que soit la destination des données.

Cependant, lorsqu'on utilise des méthodes d'analyse des profils en long pour mesurer les défauts d'uni des traces, d'autres types de mesures peuvent mieux convenir pour indiquer certaines qualités de l'état de la chaussée, ou certains éléments particuliers des réactions des véhicules couvertes par l'indice IRI. Les méthodes présentées ici ne concernent que la mesure et l'évaluation de l'indice IRI.

Figure 1. Indice IRI pour différents types de chaussées



2.2 Les méthodes de mesure des défauts d'uni des routes

Les nombreuses méthodes de mesure des défauts d'uni des routes peuvent être regroupées en quatre classes d'après le rapport plus ou moins direct des mesures obtenues avec l'indice IRI, rapport qui, à son tour, influe sur les impératifs d'étalonnage et sur la précision liée à leur utilisation.

2.2.1 Classe 1 : profils de précision. Cette classe rassemble les normes de précision les plus strictes pour les mesures de l'indice IRI. Une méthode de classe 1 requiert la mesure du profil longitudinal d'une trace de roue (sous forme d'une série de points de repère situés à faible distance les uns des autres sur la trace de roue) pour servir de base au calcul de l'indice IRI. En ce qui concerne les méthodes statiques d'analyse des profils en long, la distance entre les points de relèvement ne doit pas être supérieure à 250 mm (4 mesures/mètre) et la précision des mesures de hauteur doit être de 0,5 mm pour les chaussées très lisses (des mesures moins précises sont acceptables pour des surfaces plus rugueuses, comme il est précisé dans la section 3.2). Les analyseurs de profil longitudinaux à grande vitesse peuvent constituer un moyen de mesurer rapidement l'indice IRI; cependant, l'analyseur doit être validé à un moment ou à un autre à l'aide d'une méthode bien établie, comme par exemple la méthode de la mire et du niveau, pour contrôler sa précision. Jusqu'à ce jour, seules la méthode utilisant la mire et le niveau (section 3.3.1) et celle utilisant l'analyseur de profil statique (section 3.3.2), ont démontré leur validité comme méthodes de classe 1 pour la détermination de l'indice IRI dans un large spectre de niveaux de défauts d'uni et de types de routes, sur les segments de 320 m de longueur utilisés dans l'IRRE.

Les méthodes de cette classe sont celles qui produisent des mesures d'une telle qualité que la reproductibilité de la valeur IRI ne peut être améliorée. Cette définition peut à première vue sembler viser un objectif irréalisable, mais il existe d'ordinaire une limite pratique à la répétabilité des mesures des défauts d'uni des routes, même quand la méthode et l'instrument sont "parfaits". Les limites pratiques résultent de ce qu'il est impossible de mesurer les défauts d'uni des routes plusieurs fois exactement dans la même trace de roue. Une méthode appartient à la classe 1 si l'erreur de mesure est négligeable par rapport à l'incertitude résultant de l'impossibilité de repasser exactement sur la même trace de roue.

Lors de l'IRRE, les méthodes qui se sont avérées être de la classe 1 ne présentaient qu'une erreur de mesure négligeable sur les segments de 320 m de long, quand les traces de roue étaient marqués de repères peints à intervalles d'environ 20 m. Dans ces conditions, la répétabilité correspond à un indice IRI d'environ 0,3 m/km sur les routes revêtues et 0,5 m/km sur tous les autres types de routes. Pour les traces de roue marquées encore plus précisément, les méthodes présentées comme étant de classe 1 peuvent ne pas répondre à cette classification (bien qu'il soit rare que ce niveau de précision soit nécessaire). Par ailleurs, des spécifications moins rigoureuses peuvent convenir si l'on utilise des segments d'essai plus longs ou si les traces de roue ne sont pas repérées du tout.

Dans bien des cas, une méthode qui garantit ce degré de précision aura l'inconvénient de nécessiter un travail important pour effectuer les mesures des défauts d'uni (par exemple, par la méthode de la mire et du niveau). La précision obtenue lorsque l'on utilise une méthode de classe 1 est par définition égale ou supérieure aux exigences d'une application pratique donnée, et on considère ainsi que l'utilité principale d'une méthode de classe 1 réside dans la possibilité de valider d'autres méthodes, ou d'obtenir des données de haute précision dans certains cas spéciaux.

2.2.2 Classe 2 : autres méthodes d'analyse des profils en long. Cette classe comprend toutes les autres méthodes dans lesquelles la mesure du profil doit servir de base au calcul direct de l'indice IRI, mais qui ne permettent pas d'atteindre la précision exigée pour une mesure de classe 1. Bien que les matériels et les méthodes utilisés pour mesurer les profils soient fonctionnellement vérifiés par étalonnage indépendant, leur précision est inférieure à ce qui est requis pour la classe 1. En conséquence, la précision des indices IRI calculés à partir d'une mesure de profil de classe 2 peut être inférieure à la

limite pratique en raison des erreurs aléatoires ou systématiques se produisant dans un certain nombre de situations. Cette classe comprend actuellement des valeurs IRI calculées à partir de profils mesurés avec des analyseurs de profils en long à grande vitesse ou avec des méthodes statiques qui ne satisfont pas aux conditions concernant la précision ou les intervalles entre les mesures indiqués à la section 3.2.

Actuellement, la remorque APL (section 3.3.3) est le seul analyseur dynamique qui ait été validé expérimentalement dans la plage des défauts d'uni couverte par l'IRRE. L'analyseur de profil inertiel type GMR à roues palpeuses a été validé pour des routes dont l'indice IRI est inférieur à environ 3 m/km (2), indice au-dessus duquel des erreurs se produisent du fait du rebond des roues palpeuses. Ce type d'analyseur n'existe cependant plus sur le marché aux Etats-Unis, les roues palpeuses ayant été remplacées par des capteurs sans contact pour supprimer le problème du rebondissement. Deux analyseurs de profil à grande vitesse sont actuellement commercialisés par la société K.J. Law (section 3.3.4); ils sont tous les deux conçus pour fournir l'indice IRI pendant les mesures. Tous les deux sont actuellement considérés comme des systèmes de classe 2, bien que leur précision et leur domaine de fonctionnement n'aient pas encore été vérifiés à la mire et au niveau. Des essais avec ces analyseurs de profil et avec d'autres, ont été effectués, mais les données n'ont pas encore pu être analysées suffisamment pour que leur capacité à mesurer l'indice IRI puisse être quantifiée[1].

Parmi les instruments de précision utilisés pour mesurer l'uni des routes, les analyseurs de profil à grande vitesse ont l'inconvénient d'être les plus chers et les plus complexes et de nécessiter en général des opérateurs ayant une formation d'ingénieur. Cependant, ils ont le grand avantage de pouvoir produire rapidement des mesures de haute qualité sans nécessiter un travail excessif pour maintenir la fidélité de l'étalonnage. Le détail des opérations à effectuer pour mesurer l'indice IRI dépend très étroitement du type d'analyseur. Il faut donc consulter le fabricant. Les sections 3.3.3 et 3.3.4 décrivent brièvement plusieurs analyseurs à grande vitesse utilisés pour mesurer l'indice IRI.

2.2.3 Classe 3 : évaluations de l'indice IRI à partir d'équations de corrélation. Actuellement, la quasi-totalité des données relatives aux défauts d'uni des routes rassemblées dans le monde le sont à l'aide d'un appareil de type-réponse. Ces systèmes dépendent des propriétés dynamiques d'un véhicule pour rapporter les mesures à une échelle et fournir un indice des défauts d'uni comparable à l'indice IRI. Cependant, chaque véhicule possède des propriétés dynamiques particulières qui varient avec le temps. Les mesures "brutes" de la PMR obtenues à l'aide d'un appareil de type-réponse doivent donc être corrigées par rapport à l'échelle des indices indice IRI à l'aide d'une équation d'étalonnage obtenue expérimentalement pour cet appareil de type-réponse particulier. Comme la dynamique d'un véhicule change facilement, il faut appliquer aux véhicules utilisés des règles très rigoureuses d'entretien et d'utilisation, et des essais de contrôle doivent être inclus dans les opérations de routine. Lorsque des changements se produisent, il n'existe pas de correctif simple qui puisse être appliqué; il faut réétalonner l'ensemble véhicule-indicateur de roulance.

Cette classe comprend également d'autres instruments de mesure des défauts d'uni des routes capables de générer des valeurs qui sont en corrélation raisonnable avec l'indice IRI (par exemple, la règle mobile). Les mesures obtenues peuvent servir à évaluer l'indice IRI au moyen d'équations de régression quand une expérience de corrélation a été effectuée. Cela n'en vaut généralement pas la peine (on peut obtenir de meilleures mesures plus facilement), à moins que l'on ne doive convertir une grande quantité de données recueillies avant l'introduction de l'échelle IRI.

---

[1] En 1984 a eu lieu à Ann Arbor, Michigan, une rencontre sur les analyseurs de profil, destinée à déterminer les caractéristiques de fonctionnement d'un certain nombre d'analyseurs, notamment des systèmes actuels sans contact de K.J. Law (E.U.), le système suédois VTI à laser, la remorque APL et plusieurs autres systèmes qui ne se trouvent pas dans le commerce. L'étude était financée par l'Administration fédérale des routes des Etats-Unis (FHWA) et conduite par l'UMTRI (3).

Une méthode de mesure des défauts d'uni des routes appartient à la classe 3 quand elle fait intervenir la méthode de "d'étalonnage par corrélation" exposée à la section 4.2, quel que soit le type des instruments de mesure ou du véhicule utilisés, pour obtenir des mesures de l'uni non corrigées. Alors que la plupart des méthodes de classe 3 utilisent un indicateur de roulance qui accumule les mouvements de la suspension du véhicule pour en déduire la PMR (voir à la section 4.1), d'autres systèmes emploient des accéléromètres ou d'autres genres d'instruments de mesure. Cependant, c'est l'appareil de type-réponse basé sur l'utilisation d'un indicateur de roulance pour mesurer la PMR qui se rapproche le plus du concept d'IRI, et les règles générales données ici se rapportent surtout à l'utilisation d'un appareil de type-réponse étalonné, comme méthode principale dans la classe 3.

Un appareil de type-réponse n'appartient pas à la classe 3 s'il n'est pas étalonné par corrélation. Sans étalonnage, il n'y a pas de lien vérifiable entre les mesures obtenues par deux appareils de type-réponse différents, ni avec l'échelle IRI.

La reproductibilité associée à un appareil de type-réponse étalonné est d'environ 0,5 m/km (14 %) pour des sections de routes revêtues de 320 m de long, et d'environ 1,0 m/km (18 %) pour les surfaces non revêtues de la même longueur. Ces valeurs de la précision ne sont que des moyennes approximatives, les erreurs variant généralement à la fois avec l'ampleur des défauts d'uni et le type de surface. Une précision supérieure peut être obtenue en utilisant des sections d'essai plus longues.

2.2.4 Classe 4 : estimations subjectives et mesures non étalonnées. On a besoin parfois d'une base de données sur l'uni des routes mais une grande précision n'est pas essentielle, ou bien elle ne peut être atteinte avec les moyens disponibles. Cependant, il est toujours souhaitable de rapporter les mesures à l'échelle IRI. Dans ces cas, on peut utiliser une estimation subjective faisant intervenir soit une expérience de conduite sur la route, soit un examen visuel. Une autre possibilité consiste à utiliser les mesures d'un instrument non étalonné. La conversion de ces observations en indices indice IRI se réduit à des équivalences approximatives qui, au mieux, peuvent être établies comme il est exposé dans la section 5.0, par comparaison avec des descriptions orales ou des descriptions illustrées de routes dont on connait l'indice IRI. Pour l'essentiel, les estimations de l'équivalence, aussi approximatives qu'elles soient, constituent un étalonnage que l'on pourrait appeler "étalonnage par description".

Quand ces estimations subjectives de l'uni sont converties en indices IRI, le pouvoir de résolution est limité à environ 6 niveaux de défauts d'uni, avec une précision qui va de 2 à 6 m/km (environ 35 %) sur l'échelle IRI (la précision, exprimée soit en unités absolues. soit en m/km, soit en pourcentage, varie généralement selon l'ampleur des défauts de d'uni et le type de surface).

Avec les appareils de type-réponse, remarquons qu'à moins d'utiliser un étalonnage par corrélation valable, il n'existe pas de moyen de rapporter les mesures à l'échelle standard. Ainsi, un appareil de type-réponse non étalonné tombe dans la classe 4.

2.3 Les facteurs qui agissent sur la précision

Les données sur les défauts d'uni sont normalement utilisées dans des applications qui représentent deux extrêmes : 1) les analyses statistiques faisant intervenir des mesures de l'uni portant sur des parties importantes d'un réseau routier et (2) les relevés individuels effectués sur certains sites particuliers de la route et se rapportant aux défauts d'uni. Les données sur les défauts d'uni des routes comprendront obligatoirement quelques erreurs dues à des facteurs aléatoires et systématiques. L'importance revêtue par ces erreurs dépend de la nature de l'application à laquelle les données sont destinées.

Un exemple du premier type d'application est donné par l'étude des coûts d'utilisation de la route dans laquelle la base des données sur les coûts d'exploitation d'un parc de véhicules est déterminée par

régression à partir de la base des données sur l'uni des routes sur lesquelles ces véhicules sont utilisés. Dans un tel cas, il est nécessaire de déterminer les différents niveaux des défauts de l'uni pour comparer les tendances des coûts par régression. Les erreurs aléatoires des mesures de l'uni dues à une précision médiocre ou à une caractéristique particulière d'une route auront tendance à être éliminées si l'étude inclut un nombre élevé de sites routiers. Ainsi, les erreurs aléatoires n'ont pas de grandes conséquences dans ce type d'étude. Par contre, les erreurs systématiques faussent les rapports entre les coûts. En conséquence, il faut prendre des dispositions pour maintenir les erreurs systématiques à un niveau minimum. Les résultats de l'étude ne seront pas transposables, à moins qu'une échelle des défauts d'uni des routes standard ne soit utilisée et que des dispositions soient prises pour veiller à ce que les données sur les défauts d'uni des routes se conforment plus ou moins à cette échelle.

Les études de contrôle de la détérioration des voies ou des effets de l'entretien sont des exemples du deuxième type d'application. Dans de tels cas, il est intéressant de relever fréquemment les petites modifications de l'état de l'uni de sites particuliers de la route. Les erreurs de mesure aléatoires réduisent le degré de certitude avec lequel on peut discerner les tendances. On peut déterminer et corriger les distorsions constantes des données (erreurs systématiques) afin de comparer les routes ou d'appliquer des critères économiques, mais il est peut-être encore plus important de faire en sorte que ces erreurs ne changent pas avec le temps. Ainsi, dans le cas des mesures à utiliser pour ces applications, l'opérateur doit appliquer des méthodes qui minimisent les erreurs aléatoires tout en maximisant la stabilité dans le temps. Ceci se traduit normalement par l'utilisation du même équipement et du même personnel pour le suivi régulier d'un site d'une route, par la répétition des opérations pour vérifier leur répétabilité, et par le contrôle scrupuleux de l'étalonnage des appareils.

Dans les applications analogues à celles-ci, le degré de précision nécessaire des mesures est directement fonction de la destination finale des données. La précision désirée commande alors l'importance des efforts à consentir pour obtenir les données. Chaque application a sa propre sensibilité particulière aux différentes sources d'erreurs. Pour prendre une décision rationnelle quant à la qualité des mesures à obtenir, il est avantageux de se rendre compte que trois genres d'erreurs peuvent être à l'origine de l'imprécision des mesures de l'uni : les erreurs de répétabilité, de calibration et de reproductibilité.

2.3.1 **L'erreur de répétabilité**. Lorsque des mesures répétées sont effectuées avec un instrument, on ne peut s'attendre à une concordance parfaite parce que le processsus de mesure comporte des facteurs aléatoires qui varient d'une fois à l'autre. Le niveau de répétabilité n'est pas toujours évident parce que les instruments produisent souvent des résultats quantifiés qui masquent les effets des petites variations. Il faut alors supposer que la répétabilité n'est pas supérieure à la moitié de l'unité de la quantification. Par exemple, un appareil de type-réponse qui produit des comptages correspondant à 3,0 mm présente une erreur de répétabilité d'au moins 1,5 mm.

Lorsqu'on mesure les défauts d'uni d'une route en relevant soigneusement son profil longitudinal, la précision est limitée par : 1) les instruments utilisés pour mesurer le profil, 2) la localisation aléatoire des anomalies sur la trace de roue sur laquelle les mesures de cote sont relevées et 3) le choix semi-aléatoire de la position latérale de la trace de roue parcourue. Pour réduire les deux premières sources d'erreurs, il faut imposer aux mesures des spécifications plus strictes (à savoir : mesures de cote plus précises et intervalles plus faibles entre les points de relèvement). Lorsque ces sources d'erreur sont maîtrisées, l'imprécision associée au choix de la trace de roue devient le facteur le plus important, responsable de variations qui peuvent atteindre 5 % lorsque la longueur de la trace est de 320 m.

Lorsqu'on mesure les défauts d'uni d'une route avec un appareil de type-réponse, la répétabilité est influencée par les déplacements latéraux en partie aléatoires de l'appareil de type-réponse sur la route et aussi par d'autres facteurs aléatoires, tels que les variations de vitesse et les petites modifications de la dynamique du véhicule qui se produisent même dans de brefs intervalles. Ces sources de variabilité peuvent

être maintenues au même niveau que pour la mesure directe du profil si les opérations sont conduites avec précaution.

Les erreurs de répétabilité sont fondamentalement de nature aléatoire et on peut donc les maîtriser en élargissant le processus de mesure, de manière à ce qu'elles s'annulent par l'établissement de moyennes. On peut y arriver très simplement en utilisant des sections d'essai d'une longueur suffisante.

Une deuxième façon d'établir des moyennes consiste à faire des mesures répétées sur le même site d'essai. On peut ainsi réduire l'erreur de répétabilité sur des sections normalement trop courtes pour établir des moyennes suffisantes. En général, l'erreur de répétabilité est inversement proportionnelle à la racine carrée de la longueur totale couverte, en prenant comme longueur totale la longueur du site multipliée par le nombre de répétitions. Ainsi, l'erreur probable sur un site d'essai de 1,6 km est approximativement la même que celle qu'on obtiendrait sur un site d'essai de 320 m après cinq répétitions (5 X 320 m = 1,6 km). Empiriquement, il est recommandé de choisir une longueur totale de 1,6 km (1,0 mille) ou plus pour minimiser l'erreur de répétabilité, avec des instruments circulant à des vitesses courantes sur route.

Une autre méthode pour augmenter la base de calcul des moyennes pour un appareil de type-réponse consiste à utiliser une vitesse inférieure pour une longueur de site d'essai donnée; cependant, cette méthode est déconseillée, parce qu'une modification de la vitesse entraîne un changement de signification des mesures de l'uni des routes et augmente les autres erreurs.

2.3.2 L'erreur d'étalonnage. Les instruments sont sujets à des erreurs systématiques. Il en résulte que les mesures effectuées avec un instrument sont normalement différentes de celles effectuées avec un autre, ou qu'un même instrument varie avec le temps. On peut corriger ces erreurs par étalonnage. Ainsi, avec des mesures étalonnées, les différences systématiques sont annulées, ce qui ramène les mesures à une échelle commune. Cependant, si l'étalonnage ne couvre pas toutes les variables qui affectent les mesures, il y aura une erreur résiduelle d'étalonnage et la remise à l'échelle ne sera pas correcte.

Méthodes d'analyse du profil (classes 1 et 2). L'erreur d'étalonnage est minime lorsqu'on utilise des mesures directes de profil pour obtenir l'indice IRI. Les instruments de mesure du profil sont étalonnés en usine et ne changent guère à condition de les traiter soigneusement. Toutefois, des erreurs systématiques peuvent apparaître dans des mesures basées sur les profils lorsque 1) les mesures des cotes du profil comportent elles-mêmes des erreurs (d'ordinaire, elles font apparaître le profil comme plus accidenté qu'il n'est), 2) lorsque les mesures du profil sont trop espacées, de sorte que certaines caractéristiques des défauts de l'uni des routes manquent (ce qui fait paraître le profil plus lisse qu'il n'est) et 3) lorsque les mesures du profil sont soumises à un lissage ou à une limitation de la bande passante, comme c'est le cas avec un analyseur de profil dynamique (ce qui fait apparaître le profil plus lisse). Les spécifications et les méthodes recommandées dans les sections 3.2 et 3.3 ont été conçues en vue de maintenir ces effets à des niveaux négligeables.

Appareil de type-réponse (classe 3) : Les appareils appartenant à l'appareil de type-réponse nécessitent un étalonnage par corrélation avec une référence (section 4.2) pour de très nombreuses raisons, dont les trois suivantes :

1) La réponse dynamique globale d'un véhicule à appareil de type-réponse quelconque s'écarte toujours plus ou moins de celle du véhicule de référence. C'est pourquoi les mesures PMR "brutes" obtenues par l'appareil de type-réponse peuvent être plus ou moins élevées que des valeurs correspondantes de l'indice IRI, selon que la réponse de l'appareil de type-réponse est plus ou moins importante que celle de la référence.

2) Dans l'appareil de type-réponse, l'indicateur de roulance a généralement du jeu et d'autres formes d'hystérésis, qui lui font manquer des mesures, ce qui donne des résultats trop faibles.

3) Les mouvements de la suspension de l'appareil de type-réponse comprennent des effets dus à des facteurs autres que les défauts d'uni de la route, tels que, par exemple, une roue ou un pneu voilé. Les mesures de l'uni sont alors trop élevées.

Les sources d'erreurs systématiques d'un appareil de type-réponse réagissent entre elles et leurs effets ne sont pas linéaires. Il peuvent varier avec l'ampleur des défauts d'uni, le type de surface, la température et d'autres facteurs environnementaux. La seule manière d'en tenir compte est de les corréler avec des mesures de l'indice IRI obtenues par une méthode de référence (classe 1 ou 2). Cette opération correspond essentiellement à un "étalonnage par corrélation". La procédure décrite dans la section 4.2 est conçue en vue d'éliminer l'erreur d'étalonnage des mesures effectuées avec un appareil de type-réponse.

2.3.3 L'erreur de reproductibilité. Lors de mesures complexes comme celles des défauts d'uni des routes par une méthode autre que la mesure directe du profil, il est possible (et courant) que deux instruments différents classent plusieurs routes selon un ordre différent. Il existe une erreur qui est aléatoire en ce qui concerne le résultat (le choix de la route), mais systématique en ce qui concerne l'instrument. Même quand des mesures obtenues avec un certain instrument (ou une certaine méthode) sont hautement répétables, elles ne sont pas nécessairement reproductibles avec un autre instrument (ou méthode). Le problème est que les deux méthodes de mesure ont des différences qui sont plus complexes que les simples facteurs d'échelle. Alors que les erreurs de répétabilité peuvent être maîtrisées en répétant les essais et en faisant des moyennes et que les erreurs d'étalonnage peuvent être compensées par un étalonnage valable, les erreurs de reproductibilité existeront toujours lorsque l'instrument de mesure diffère de l'instrument de référence.

Dans le cas de mesures de profil effectuées avec un instrument de classe 1, l'erreur de reproductibilité de l'instrument est pratiquement nulle et l'incertitude ne dépend plus que des limites imposées par la répétabilité. Des contrôles de répétabilité peuvent donc être utilisés pour améliorer la précision d'ensemble.

Mais dans le cas de mesures par appareil de type-réponse, il n'est pas possible de concevoir les essais ni de traiter les données d'une façon qui puisse résoudre des différences entre les instruments se traduisant par des mesures de l'indice IRI trop fortes sur une route et trop faibles sur une autre. Il est possible, cependant, d'adopter une méthode grâce à laquelle les caractéristiques de l'appareil de type-réponse correspondront le plus étroitement possible à celles de l'appareil de référence. Les règles de sélection et d'utilisation d'un appareil de type-réponse (sections 4.1 et 4.3) ont été rédigées en gardant ces considérations à l'esprit.

Avec toutes les méthodes de mesure, une autre manière de réduire l'erreur de reproductibilité consiste à mesurer les défauts d'uni sur des sites plus longs. L'erreur de reproductibilité étant aléatoire pour chaque segment de route, elle peut être quelque peu réduite par des moyennes obtenues grâce à des sites plus longs. A la différence de l'erreur de répétabilité, cette erreur ne diminue pas nécessairement avec la racine carrée de la longueur.

La reproductibilité n'est pas augmentée par la répétition de mesures sur le même site, puisque l'effet est systématique pour un site donné.

2.4 Planification d'un projet de mesure

L'exécution d'un programme de mesure des défauts d'uni des routes de haute qualité dépend entièrement de la définition de procédures bien conçues et respectées rigoureusement pendant toute la durée du projet. Pour aider le planificateur à évaluer les besoins logistiques, ce chapitre présente dans leurs grandes lignes les besoins de planification propres aux trois grandes catégories de projets de mesure des défauts d'uni.

2.4.1 Surveillance à long terme du réseau. Les programmes de surveillance à long terme de l'uni des routes font partie intégrante des évaluations de l'état du réseau et des systèmes de gestion des chaussées. Leurs objectifs sont d'ordinaire :

1) l'établissement sur une base régulière, d'un résumé de l'état du réseau pour évaluer l'efficacité des actions entreprises,

2) l'introduction des normes de conception des chaussées, des mesures d'entretien et des coûts des transports, dans une analyse de rentabilité au niveau du réseau,

3) l'évaluation quantitative des travaux en vue de déterminer les priorités dans les programmes d'entretien et de rénovation.

Pour atteindre ces objectifs, il faut d'ordinaire que les mesures soient continues sur des maillons du réseau dont la longueur totale couverte doit dépasser 1000 km (ou même 10.000 km). Il est essentiel que les mesures faites dans différentes parties du réseau soient directement comparables et qu'il y ait cohérence dans le temps. Cependant, les impératifs de précision s'appliquant à ces différentes mesures de l'uni ne sont pas d'ordinaire aussi sévères que pour les autres types de projets, parce que l'établissement de moyennes diminue l'effet des erreurs aléatoires. Des trois sources d'erreur décrites à la section 2.3, l'erreur d'étalonnage est la plus difficile à contrôler.

La planification d'un programme de surveillance à long terme doit faire entrer en ligne de compte :

a) **Le type des instruments de mesure des défauts de l'uni** - La rapidité de collecte et le traitement automatique des données sont des considérations d'une importance capitale pour faciliter la mise en mémoire dans une base de données et simplifier l'analyse. Il ne faut prendre en considération que les instruments qui peuvent fonctionner aux grandes vitesses (l'instrument doit fonctionner au moins à 50 km/h et de préférence à 80 km/h ou plus). Tous les types d'appareil de type-réponse conviennent. Un profilomètre à grande vitesse convient également et il peut fournir des valeurs descriptives utiles en plus de l'indice IRI.

b) **Le nombre d'instruments** - Lorsqu'un réseau est très long ou très étendu, il peut être nécessaire de disposer de plusieurs instruments. Si c'est le cas, un parc d'appareils de type-réponse peut être moins coûteux qu'un parc d'analyseurs de profil. Les véhicules utilisés pour les appareils de type-réponse doivent de préférence être de même marque pour des raisons d'interchangeabilité, ceci n'étant pas essentiel cependant lorsque des procédures valables d'étalonnage ont été respectées.

c) **Des segments d'étalonnage (pour les appareils de type-réponse seulement[2])** - Il faut disposer de 8 à 20 segments d'étalonnage situés en position centrale et, si nécessaire, dans les régions excentrées pour permettre l'étalonnage complet des véhicules d'essais à intervalles réguliers (section 4.2).

---

[2] Les analyseurs de profils sont calibrés en usine ou en laboratoire.

d) Des segments de contrôle - Un petit nombre de segments de contrôle (entre 3 et 5) sont nécessaires dans chaque région d'utilisation des instruments pour permettre des vérifications quotidiennes ou hebdomadaires (section 4.3.4).

e) La vitesse de mesure (pour les appareils de type-réponse seulement[3]) - Elle peut être le fruit d'un compromis entre des nécessités contradictoires. La vitesse standard de 80 km/h est vraisemblablement applicable dans la majorité des situations. Une géométrie de route ingrate ou l'encombrement peuvent conduire à réduire la vitesse de 50 ou 32 km/h sur certains maillons, mais le choix des instruments à utiliser pour l'essentiel de l'étude ne doit pas en être influencé. Par contre, la collecte simultanée d'autres données au cours de l'étude peut influencer le choix.

f) Le traitement des données et la production de comptes rendus - Les données rassemblées doivent comporter la localisation et d'autres repères permettant de les rapporter à d'autres données relatives à la gestion des chaussées. Pour faciliter l'acquisition des données, il faut envisager, au stade le plus précoce possible, l'informatisation et l'utilisation de fiches standardisées chaque fois que cela est nécessaire. Il faut enregistrer les mesures sur des intervalles ne dépassant pas 1 km. Les comptes rendus comporteront d'ordinaire des valeurs moyennes, soit pour chaque maillon, soit pour chaque segment homogène de 10 km ou plus, avec des histogrammes récapitulatifs de la répartition des défauts d'uni par segment de route. Pour faciliter les estimations des coûts d'exploitation des véhicules, ces comptes-rendus doivent coïncider tout au moins avec les principaux changements du volume de la circulation. Pour augmenter l'efficacité, on peut gérer les données de manière à séparer les comptes rendus détaillés destinés à l'évaluation simultanée des projets et ceux moins détaillés destinés à l'établissement des priorités.

2.4.2 **Suivi à court terme du projet.** L'évaluation de projets spécifiques de rénovation ou d'amélioration implique soit des observations à court terme s'étendant sur des périodes pouvant atteindre 3 ans, soit des mesures ponctuelles des défauts d'uni. D'ordinaire, les sites ont de 5 à 50 km de longueur et ne sont pas nécessairement contigus. Il faut porter une grande attention à la précision et au degré de détail requis, car les impératifs de précision peuvent quelquefois être plus sévères que dans le cas d'une surveillance à long terme du réseau (section 2.4.1). Par ailleurs, si l'on n'a besoin que de mesures approximatives des défauts d'uni, des économies considérables sont réalisables.

Si l'on désire un historique des défauts d'uni de la surface, l'instrument doit être capable de fournir des mesures répétables sur une certaine période de temps, et il est important de maintenir l'erreur d'étalonnage à un niveau modeste. Ainsi, si une haute précision est nécessaire, on peut établir la moyenne de plusieurs mesures pour réduire l'erreur de répétabilité qui pourrait, sans cela, masquer les petites modifications des défauts d'uni. En général, une productivité élevée dans la collecte des données n'est pas essentielle dans le cas des projets à court terme et il faut donc s'efforcer d'obtenir des instruments de mesure qu'ils fournissent des données d'une qualité aussi élevée que possible.

Dans certains cas, la transposabilité des données (obtenues avec l'échelle IRI) peut ne pas être aussi importante que le maintien d'une cohérence interne élevée. En pratique cependant, les vérifications minutieuses nécessaires à cette cohérence entraînent souvent l'adhésion pure et simple à l'échelle IRI (en particulier si des appareils de type-réponse sont en cause).

a) Méthodes d'analyse de profil (classes 1 et 2) - Les méthodes d'analyse de profil sont adéquates et peuvent facultativement fournir, en plus de l'indice IRI, d'autres valeurs numériques descriptives utiles, qui peuvent servir à diagnostiquer la nature et l'origine probable d'un défaut (par exemple, l'APL 72 produit

[3] Les impératifs de vitesse des analyseurs de profil sont fonction de leur type.

normalement des indices de défauts d'uni dans trois bandes de fréquences (ou gammes d'ondes). Les défauts d'uni de grande longueur d'onde dénotent une instabilité du hérisson ou de l'assiette, tandis que ceux situés dans la bande des longueurs d'ondes courtes indiquent le mauvais état de la base ou du revêtement).

Si l'on dispose d'un analyseur de profil, il est probable qu'il peut être utilisé sans modification importantes du mode d'emploi; il suffit de prévoir un format de compte rendu plus détaillé et éventuellement un marquage plus soigneux des sites. Si l'on ne dispose d'aucun système de mesure de l'uni, un analyseur de profil peut être importé à titre temporaire à un coût total inférieur à l'achat de systèmes moins perfectionnés qui nécessitent des opérations d'étalonnage considérables.

b) Appareil de type-réponse étalonné (classe 3) - Quand on désire une grande précision, les méthodes utilisant un appareil de type-réponse doivent être appliquées avec rigueur pour donner des résultats satisfaisants. Dans la mesure du possible, il faut utiliser un instrument unique pour effectuer toutes les mesures afin de minimiser l'erreur de reproductibilité. Il peut être nécessaire de recommencer l'ensemble de l'étalonnage (voir section 4.2) plus fréquemment que pour d'autres applications, car des modifications même peu importantes des propriétés de réponse de l'appareil de type-réponse peuvent masquer des informations intéressantes relatives aux défauts d'uni.

Si l'on dispose d'un appareil de type-réponse entièrement équipé (dans le cadre d'un projet à long terme), il peut éventuellement être mis en oeuvre sans modification importante du mode d'emploi : il suffit de prévoir des fiches de mesures et de compte rendus plus détaillés. Cependant, si les impératifs de précision sont notablement plus sévères que pour l'autre projet, le mode d'emploi devra alors être changé en conséquence, de façon à assurer un contrôle plus serré de l'état du véhicule (section 4.1) et un étalonnage plus fréquent (section 4.2). Si les sites d'étalonnage du véhicule d'essai sont éloignés (de plus de 100 km) du projet, une série de 3 à 6 sites de contrôle doit être établie à proximité (section 4.3.4).

S'il s'agit de comparer des mesures d'un appareil de type-réponse prises sur des sites différents, il est absolument essentiel que toutes les mesures soient faites à la même vitesse. S'il n'est pas possible d'effectuer des mesures à 80 km/h, il faut choisir la vitesse commune la plus élevée pouvant être utilisée sur tous les sites. Si l'on choisit une vitesse non standard, l'erreur de reproductibilité risque d'être plus importante quand il s'agit de comparer des données issues de plusieurs appareils de type-réponse différents, mais moins importante quand un seul appareil de type-réponse est utilisé pour le relevé. Ainsi, les données sont d'autant plus cohérentes sur le plan interne, mais d'autant moins transposables.

S'il faut créer un système de mesure pour le projet, on peut fixer des impératifs minimaux adaptés soit à un système temporaire importé, soit à l'embryon d'un système qui pourra par la suite être développé.

c) Mesures non étalonnées ou estimations subjectives (classe 4) - Si une faible précision est acceptable, comme c'est souvent le cas aux stades précoces d'un projet ou dans des zones d'accès difficile, un appareil de type-réponse étalonné approximativement ou une méthode d'évaluation subjective (classe 4) peuvent être utilisés rapidement et très utilement, avec des frais de mise en oeuvre peu élevés.

d) Traitement des données et comptes rendus - D'ordinaire, les lectures doivent être faites à intervalles de 0,1 ou 0,2 km. Les résultats sont présentés habituellement sous forme de graphiques à barres des profils en long, comprenant 95 pour cent des relevés et des moyennes couvrant des longueurs homogènes, ou un codage faisant ressortir les segments à problèmes. La présentation doit faciliter la fixation des priorités, ainsi que la planification et la conception de projets de rénovation et d'amélioration.

2.4.3 Surveillance précise dans un but de recherche. Les recherches ayant pour but de quantifier des changements relativement modestes de l'uni des routes à court ou à moyen terme (3 à 7 ans) exigent une haute précision de mesure. Un grand nombre d'études de ce type sont entreprises dans

des pays qui s'efforcent d'étalonner ou d'établir des fonctions de prévision de la détérioration des routes pour les utiliser à la gestion des chaussées et aux analyses économiques. D'ordinaire, les sections sont courtes, d'un kilomètre ou moins, et peuvent être réparties largement dans une ou plusieurs régions pour répondre aux besoins expérimentaux concernant la circulation, le comportement des chaussées et les changements climatiques.

Lorsque des études de ce genre ont trait à des sections de route brèves, la préférence doit être donnée aux méthodes d'analyse de profil en long (classes 1 et 2), notamment aux méthodes statiques (c'est-à-dire, la mire et le niveau) quand on ne dispose pas d'un analyseur de profil à grande vitesse ou quand celui-ci n'est pas suffisamment précis. Les appareils de type-réponse de classe 3 ont fréquemment été utilisées pour cette application, mais en général, ils n'ont pas la précision voulue et entraînent des incertitudes quant aux données tendancielles. Il faut remarquer que les mesures du profil peuvent également être traitées de façon à fournir un certain nombre d'indicateurs d'état des surfaces, en plus de l'indice IRI, tandis que les appareils de type-réponse ne sont capables que de donner un seul type de mesure.

Un compromis quant à la fréquence des mesures est possible : en raison de leur précision supérieure, ne faire les mesures de classe 1 et 2 qu'annuellement et en liaison avec des activités d'entretien importantes; par contre, les mesures de l'appareil de type-réponse de classe 3 doivent être effectuées au moins 2 ou 3 fois par an, afin de vérifier les tendances indiquées par les données. La facilité de transposition du système est importante : les méthodes de classe 3 exigent la création de sections de contrôle dans les régions éloignées, tandis que les systèmes des classes 1 et 2 n'en ont pas besoin.

D'ordinaire, les méthodes de traitement et d'analyse des données sont particulières à chaque projet; ces sujets ne sont donc pas abordés ici. Les mesures doivent inclure le calcul de l'indice IRI à des fins de facilité de transposition, même si d'autres valeurs sont utilisées plus directement dans l'étude.

CHAPITRE 3

MESURE DE L'INDICE IRI A L'AIDE DES METHODES PROFILOMETRIQUES (CLASSES 1 & 2)

3.1 Description de la méthode

On ne peut obtenir de mesures de l'indice IRI de classe 1 et 2 qu'à partir d'un profil longitudinal de la route. Un profil longitudinal est une section verticale le long d'une trace de roue qui indique la cote de la surface en fonction de la distance. Le profil est décrit par l'ensemble des cotes mesurées à intervalles rapprochés le long de la trace de roue. Pour résumer les centaines ou les milliers de cotes qui représentent un profil, on analyse les données et on en déduit l'indice IRI qui sert alors de valeur unique pour quantifier l'ensemble des défauts d'uni. Les calculs sont généralement effectués au moyen d'un ordinateur numérique. On peut aussi utiliser une calculatrice de poche programmable, mais les calculs sont longs et ennuyeux et les possibilités d'erreur sont fortes. Presque tous les micro-ordinateurs conviennent au calcul de l'indice IRI et ils ont l'avantage d'être bon marché, aisément disponibles et faciles à programmer.

Parce que l'indice IRI a trait à une trace particulière parcourue par une roue le long de la voie, les personnes chargées de mesurer le profil doivent savoir exactement quel est l'endroit de la voie où cette trace se situe. Chaque fois que des mesures répétées doivent être faites par des méthodes statiques, le chemin parcouru par la roue doit être marqué clairement sur la surface de la route, de sorte que les différentes mesures correspondent au même chemin. Lorsqu'on utilise un analyseur de profil à grande vitesse, les opérateurs doivent suivre une méthode cohérente pour placer l'analyseur de profil latéralement dans la voie parcourue. La plupart des mesures effectuées avec des analyseurs de profil à grande vitesse sont relevées soit au centre de la voie parcourue, soit dans les deux traces parcourues par les roues des véhicules. En général, les résultats ne sont pas équivalents, sauf sur des routes neuves et quelquefois sur des routes en ciment Portland. Pour que les résultats soient comparables lorsque des opérateurs différents effectuent les mesures, les critères de sélection des traces de roue à mesurer doivent être soigneusement déterminés.

Les deux chemins ou traces parcourus par les pneumatiques des véhicules dans le flux normal de la circulation fournissent les mesures les plus représentatives des défauts d'uni influant sur la circulation; il est donc recommandé d'effectuer les mesures dans les traces parcourues.

3.2 Exigences de précision

L'analyse conduisant à l'indice IRI ne peut s'appliquer qu'à des informations déjà existantes; elle ne peut fournir des informations qui n'auraient pas été incluses dans les mesures du profil. Ainsi, des exigences minimums doivent être satisfaites afin d'obtenir une mesure valable de l'indice IRI par une méthode d'analyse de profil. Le tableau 1 résume ces exigences exprimées par les deux paramètres principaux intervenant dans la mesure du profil : l'intervalle entre les mesures des cotes et la précision.

a) Précision. Remarquons que la précision requise est fonction de l'ampleur des défauts d'uni. Bien que cette ampleur ne soit pas connue avant que le profil n'ait été mesuré et l'indice IRI calculé, avec de l'expérience, un opérateur expérimenté est capable de juger quand les défauts sont

suffisamment importants pour que les exigences de précision soient relâchées. Les valeurs du tableau ont été calculées en utilisant les expressions suivantes obtenues expérimentalement:

Précision de classe 1 (mm) $\leq$: 0,25 x IRI (m/km)
Précision de classe 2 (mm) $\leq$: 0,50 x IRI (m/km)

b) Intervalle entre les mesures. Les intervalles entre les mesures donnés dans le tableau sont valables pour tous les types de surfaces de route, sauf dans les cas où les défauts d'uni sont extrêmement localisés et où ils "passeraient inaperçus" si l'on utilisait les intervalles du tableau. Des exemples de défauts d'uni localisés sont les coulées de goudron, les endroits rapiécés et les petits nids-de-poule. Comme l'analyse IRI ne peut pas fournir d'informations qui ne se trouvent pas dans les mesures du profil, il est absolument essentiel que les cotes du profil soient mesurées à intervalles suffisamment rapprochés pour "saisir" les irrégularités présentant un intérêt. Dans le cas d'un analyseur de profil automatisé, il est recommandé d'utiliser un intervalle de 50 mm pour garantir que toutes les caractéristiques intéressantes des défauts d'uni seront détectées (cet intervalle risque même de ne pas être suffisant pour détecter les coulées de bitume sur une surface neuve en ciment Portland).

TABLEAU 1. Exigences de précision pour la mesure profilométrique de l'indice IRI (classes 1 et 2).

Plage de défauts d uni IRI (m/km)	Intervalle maximum commode de mesure entre points (mm) 1/ Classe 1	Classe 2	Précision des mesures des cotes (mm) 2/ Classe 1	Classe 2
1,0 - 3,0	250	500	0,5	1,0
3,0 - 5,0	250	500	1,0	1,5
5,0 - 7,0	250	500	1,5	2,5
7,0 - 10,0	250	500	2,0	4,0
10 - 20	250	500	3,0	6,0

1/ Pour les bandes marquées en pieds, les intervalles maximums commodes adéquats sont respectivement: Classe 1 = 1 pied; Classe 2 = 2 pieds.

2/ La précision de classe 1 correspond à une erreur systématique de l'indice IRI inférieure à 1,5 %. Celle de la classe 2 correspond à une erreur systématique de l'indice IRI inférieure à 5%.

Remarque: La précision de classe 2 est suffisante pour l'étalonnage des systèmes à réponse-type (appareils de type-réponse).

c) **Gammes d'ondes.** Un profil complet de route comporte des caractéristiques qui couvrent un spectre étendu (depuis les collines et les vallées jusqu'aux petites irrégularités de texture de la surface). Aucun instrument actuellement en service ne mesure toutes les caractéristiques d'un profil. Pour des raisons techniques, les instruments d'analyse du profil ne couvrent qu'une plage du spectre des longueurs d'ondes, qui est assez limitée mais dont on espère qu'elle couvrira les propriétés de la route auxquelles on s'intéresse. Une réduction plus poussée des données du profil de la route a lieu au cours du calcul de l'indice IRI.

L'analyse qui conduit à l'indice IRI joue le rôle de filtre en éliminant toutes les informations relatives au profil situées en dehors de la gamme des ondes allant de 1,3 à 30 m (collines et vallées d'une part, texture d'autre part). Les longueurs d'ondes dépassant cette bande ne contribuent pas aux dénivellations ressenties par des véhicules roulant à des vitesses proches de 80 km/h. Parce que des méthodes d'analyse du profil différentes comprennent souvent les longueurs d'onde en dehors de cette gamme, les diagrammes des profils avant le traitement des données peuvent sembler très différents, même s'ils sont obtenus à partir de la même route et que leur indice IRI est le même. Un profilomètre de peut être rangé dans la classe 2 pour la mesure de l'indice IRI s'il détecte des longueurs d'onde supérieures à la gamme de 1,3 à 30 m.

Parce que des analyses différentes appliquent des "filtres" différents à un profil mesuré, une méthode d'analyse de profil sera généralement valable pour certaines applications, mais non pour d'autres. Ainsi, des exigences de précision déterminées pour d'autres applications ne sont pas nécessairement valables pour la mesure de l'indice IRI.

3.3 Mesure du profil

3.3.1 Relevé par mire et niveau. La méthode de mesure de profil la plus connue consiste à utiliser des appareils topographiques traditionnels. L'équipement comprend une mire de précision graduée en unités commodes (les unités les plus courantes sont le cm ou le pied), un niveau qui sert à établir une ligne horizontale de référence et un ruban décamètre pour marquer les distances le long du chemin parcouru par la roue. On peut se procurer ce matériel presque n'importe où et le louer ou l'acheter à un prix bien moindre que celui des autres appareils de mesure de l'uni. Cependant, cette méthode exige un travail considérable et il vaut généralement mieux ne l'utiliser que lorsque le nombre des profils à mesurer est faible. Des instructions détaillées sur l'utilisation de la mire et du niveau dépasseraient le cadre des règles générales données dans ce manuel. Cependant, la mesure d'un profil de route ne figurant pas parmi les utilisations normales de ces instruments, des généralités concernant cette méthode sont données ci-après, en même temps que des conseils relatifs à cette application particulière.

a) **Appareils.** Dans le cas des routes revêtues, pour mesurer les cotes relatives avec la précision requise, il est nécessaire de disposer d'instruments de mesure précis, comme ceux utilisés pour les travaux de construction, car la mire et le niveau utilisés dans les travaux d'arpentage n'offrent pas la précision voulue. Dans le cas des instruments de mesure de précision, c'est-à-dire une mire et un niveau étalonnés ensemble, le niveau comprend d'ordinaire un micromètre permettant les interpolations entre les marques de la mire.

Remarquons que les exigences de précision du tableau 1 sont faciles à satisfaire avec la mire et le niveau : la précision demandée pour les cotes est en général équivalente à la résolution avec laquelle la mire peut être lue à travers le niveau, et les intervalles entre les points à mesurer correspondent aux distances (marquées sur le ruban de mesure). Avec les rubans à graduations métriques, les intervalles de 0,25 mètres conviennent pour les mesures de la classe 1 et les intervalles de 0,50 mètres pour les mesures de la classe 2. Lorsque les graduations du ruban sont en pieds, les intervalles qui

conviennent le mieux sont de 2 pieds (610 mm) pour les mesures de la classe 2 et de 0,5 pied (152,4 mm) ou de 1 pied (304 mm) pour celles de la classe 1.

b) Mesures sur le terrain. La méthodologie exacte adoptée pour mesurer et enregistrer les cotes des points choisis n'est pas importante et elle peut être adaptée à la situation locale pour tenir compte du temps, du matériel et du personnel disponibles. Des améliorations récentes mises au point au Brésil par Queiroz et d'autres auteurs pour obtenir des profils à l'aide d'une mire et d'un niveau dans le but de mesurer les irrégularités des routes se sont révélées utiles et sont indiquées ici.

Le mieux est que l'équipe chargée des relevés comporte au moins trois personnes : une pour tenir la mire, une autre pour la lecture de l'instrument, et la troisième pour prendre les notes. Lorsque c'est possible, il est souhaitable d'avoir une quatrième personne en réserve, de façon à effectuer des rotations pour combattre la fatigue. Pour servir de référence à l'équipier qui tient la mire, le ruban métallique est posé dans la trace de roue marquée, et il est maintenu en place par des poids ou à l'aide de ruban adhésif (une bonne idée consiste à marquer à l'avance les intervalles des mesures sur le ruban, avec de la peinture, pour réduire les risques d'erreurs dûs à l'équipier qui tient la mire). Le niveau doit être placé au bout du ruban et bien aligné sinon, l'équipier qui fait les lectures devra constamment repointer le niveau entre les visées.

Si la mire n'est pas parfaitement verticale, il y a une erreur de lecture égale au produit de la lecture sur la mire par le cosinus de l'angle que fait la mire avec la verticale. On réduit cette erreur en fixant un niveau à bulle sur la mire pour servir de référence. On réduit également cette erreur en mettant le niveau en station assez près par rapport au sol, ce qui réduit les effets du déplacement latéral si la mire est légèrement penchée. Il est d'ailleurs peu probable que l'inclinaison de la mire passe inaperçue car elle est très visible dans le niveau et rend la lecture de l'instrument plus difficile.

Lorsque le niveau est en station, l'équipier qui tient la mire part d'un bout du ruban, en plaçant la mire sur le ruban lui-même. Le lecteur de l'instrument lit la mesure à voix haute à l'intention du troisième équipier qui enregistre cette mesure et la répète à l'intention de l'équipier qui tient la mire pour lui signaler que la mesure est acquise. L'équipier qui tient la mire passe alors à la marque suivante sur le ruban, et ainsi de suite. Avec de la pratique, l'équipier qui se sert du niveau peut remettre l'instrument au point pendant que celui qui tient la mire passe à la position suivante, de sorte que chaque mesure ne prend que quelques secondes.

Quand l'équipe de relevé a acquis une certaine expérience dans l'établissement des profils, l'erreur humaine due à l'équipier qui tient la mire est pratiquement éliminée et les erreurs possibles se limitent à la lecture et à l'enregistrement des données. Avec des intervalles de 0,25 m, une équipe de trois peut mesurer le profil d'une trace de roue au rythme de 640 mètres par jour, en enregistrant les cotes avec une résolution de 0,1 mm (une voie de 320 m = 2560 points de mesure de la cote en une journée).

Pour réduire l'erreur due aux facteurs humains sur le terrain, une méthode utilisée en Bolivie consiste à avoir deux équipiers pour lire l'instrument et deux autres pour enregistrer les mesures faites sur la mire tenue par une seule personne. Les deux niveaux utilisés ne se trouvant pas exactement à la même hauteur, les lectures sur la mire ne sont pas identiques, mais leurs différences doivent être constantes. Cette méthode assure une vérification qui permet de découvrir rapidement les erreurs d'enregistrement et elle se prête en outre à la détection automatique des erreurs après l'introduction des données dans un ordinateur.

c) Enregistrement des données. Du fait du grand nombre de mesures (des centaines, voire des milliers par site d'observation), il est important d'éliminer le plus possible les sources d'erreurs dues aux facteurs humains. L'utilisation sur le terrain de formulaires standardisés sur lesquels les distances sont déjà imprimées contribue à limiter les erreurs d'enregistrement des données. La figure 2 montre des détails de deux formulaires utilisés pour mesurer des profils avec une mire et un niveau. En haut de la figure, on trouve le bas de la page qui comprend toutes les mesures effectuées sur la mire entre 400 et 500 pieds. La page suivante commence à 500, et répète à la première ligne les données de la dernière ligne de la page précédente (500 + 0 = 400 + 100).

d) Calcul de la cote du profil. L'optique du niveau limite la portée utilisable. Lorsque la distance de la mire atteint la limite de portée, le niveau doit être amené à la station suivante. Sur les routes en pente, il peut être nécessaire de déplacer le niveau pour que les mesures de dénivelée restent dans les limites permises par la longueur de la mire. Il est d'ordinaire commode de déplacer l'instrument en même temps que le ruban, de façon à ce que pour chaque mise en place du ruban, les mesures soient faites à partir d'une même hauteur du niveau. Pour déterminer la nouvelle hauteur du niveau il faut, à partir de la nouvelle station, faire une nouvelle lecture sur la mire restée en place au dernier point de mesure. La nouvelle hauteur de H_{nn} du niveau est alors donnée par la formule :

$$H_{nn} = H_{na} + h_{mn} - h_{ma}$$

dans laquelle H_{na} est l'ancienne hauteur du niveau, h_{mn} la nouvelle lecture sur la mire et h_{ma} l'ancienne lecture sur la mire.

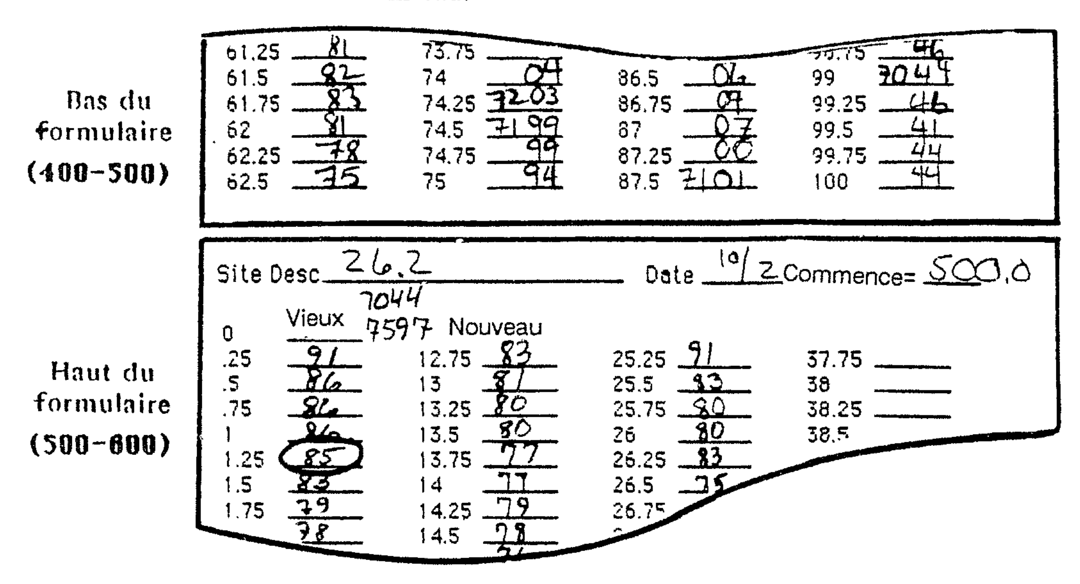
Dans l'exemple de la figure 2, le niveau a été déplacé en même temps que le ruban. La dernière lecture sur la mire, faite à partir de l'ancienne station, était de 7044 et figure en bas de la première page (400) à la position du ruban 400 + 100. La première lecture faite à partir de la nouvelle station, avec la nouvelle position du ruban, était de 7597 et figure en haut de la page suivante. La hauteur du niveau a donc augmenté de (7597 - 7044) = 553.

Dans les travaux d'arpentage traditionnels, la cote du niveau est établie avec soin, de manière à ce que la cote absolue de la surface de la route soit bien déterminée. Pour les mesures de l'uni, il suffit d'ajuster toutes les mesures par rapport à une même cote de référence. En conséquence, on peut supposer que la cote du niveau est égale à n'importe quelle cote arbitraire choisie à la première mise en station (par exemple, 10 m).

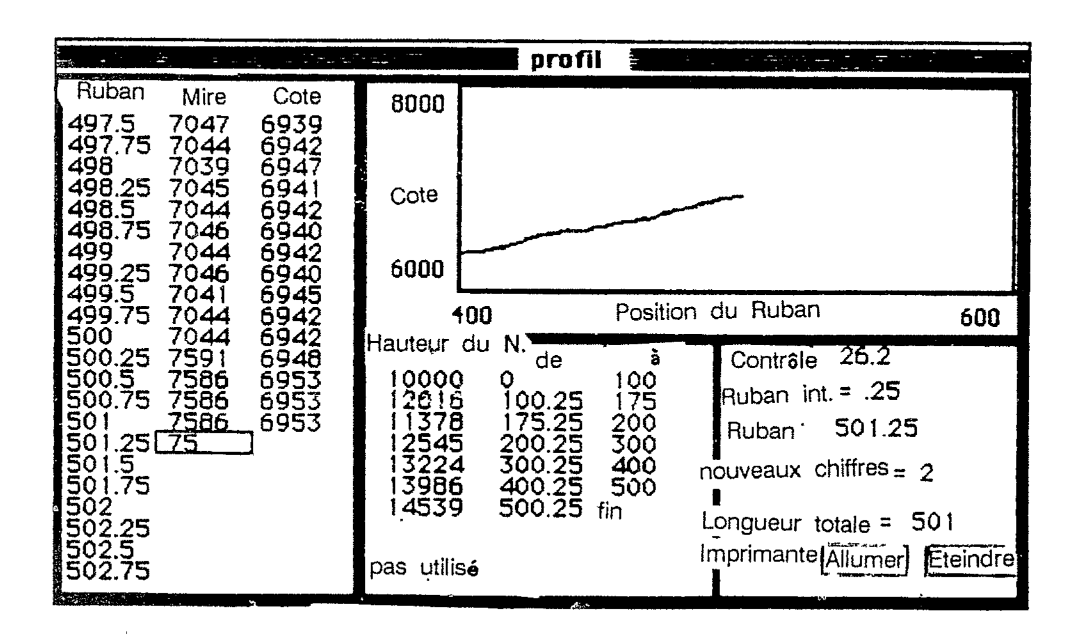
e) Introduction des données dans l'ordinateur. Les travaux ne se limitent pas à effectuer les mesures. Les relevés doivent ensuite être introduits dans un ordinateur pour calculer l'indice IRI. Comme il a été indiqué plus haut, il est essentiel d'éliminer toutes les opérations qui pourraient introduire des erreurs dans l'indice IRI finalement obtenu. Dans les travaux habituels de relevés des cotes, on soustrait, dans les notes prises sur le terrain, les lectures effectuées sur la mire de la hauteur de l'instrument, de façon à obtenir la cote ou altitude. Cependant, les données devant être finalement introduites dans un ordinateur, toutes les opérations intermédiaires de report des données, de supression du H_0 et de conversion des lectures effectuées sur la mire en cotes ou altitudes, doivent être différées. Ces tâches peuvent être effectuées par l'ordinateur après l'introduction des lectures faites sur la mire.

Si c'est possible, le programme de l'ordinateur doit présenter à l'opérateur un écran correspondant approximativement au formulaire utilisé sur le terrain, de façon à faciliter le repérage rapide des fautes de frappe éventuelles. Pour faciliter la détection des erreurs, l'ordinateur peut être programmé de façon à vérifier que les différences entre les valeurs voisines ne dépassent pas un niveau qui indiquerait que les données sont erronées.

Figure 2. Exemples de formulaires utilisés sur le terrain et de programme utilisé pour enregistrer des données collectées à l'aide de la mire et du niveau.



a) **Formulaires imprimés pour l'enregistrement sur le terrain des lectures faites sur la mire**



b) **Ecran de micro-ordinateur pendant l'introduction des données à partir du formulaire utilisé sur le terrain**

Un contrôle encore meilleur consiste à tracer le profil des cotes à une échelle suffisante pour révéler toutes les valeurs manifestement erronées. La figure 2b montre un affichage d'un programme de saisie des données qui a été utilisé avec le formulaire représenté à la figure 2a (3). Il s'agit, en fait, de la reproduction exacte de l'écran du micro-ordinateur MacIntosh d'Apple pendant d'exécution du programme, au moment où l'opérateur vient d'introduire les lectures faites sur la mire jusqu'à la position 501, et où il est prêt à introduite la lecture correspondant au point 501,25. Cet écran est montré pour indiquer à quel point la tâche d'introduction des données dans l'ordinateur a été simplifiée dans le cas de ce projet particulier.

Dans cet exemple, les distances indiquées par le ruban sont données dans la colonne à gauche de l'écran. Les nombres correspondent à ceux des formulaires utilisés sur le terrain, ce qui permet à l'opérateur de vérifier facilement que les mêmes nombres se trouvent aux mêmes positions sur l'écran et sur le formulaire. Au fur et à mesure que les lectures sur la mire sont introduites, elles apparaissent dans la deuxième colonne à partir de la gauche. La cote est alors calculée par l'ordinateur puis affichée dans la troisième colonne. En même temps, la cote est reportée sur le diagramme figurant en haut et à droite de l'écran. Les points correspondant à des données erronées apparaissent comme des "accidents" sur le diagramme, de sorte que les erreurs sont aisément décelées et corrigées (les deux encadrés en bas et à droite de l'écran ont été utilisées pour mémoriser les changements de la hauteur de l'instrument et pour contrôler le déroulement du programme).

En utilisant des micro-ordinateurs avec des programmes "faciles à utiliser", écrits spécialement pour la saisie des mesures effectuées à l'aide de la mire et du niveau, un opérateur peut introduire environ 1000 mesures en une heure (y compris la recherche des erreurs).

f) Choix de l'ordinateur. Idéalement, l'ordinateur choisi pour traiter les données de profil recueillies à l'aide de la mire et du niveau doit pouvoir les mémoriser de manière permanente sur bande ou sur disque, tracer le profil, et transférer les fichiers à d'autres ordinateurs. La possibilité de disposer d'un ordinateur pour un projet est une considération prioritaire qui est pourtant souvent négligée. Un simple ordinateur à 500 dollars, disponible 24 h sur 24, peut être beaucoup plus utile qu'un gros ordinateur à 100.000 dollars, partagé par de nombreux utilisateurs, peu disponible et difficile à programmer.

3.3.2 L'analyseur de profil statique à poutre TRRL[4]. Un analyseur de profil automatisé comme le TRRL à poutre peut réduire considérablement le travail de relevé des profils. Une équipe de deux personnes peut mesurer les cotes à 100 mm d'intervalle dans les deux traces de roue d'une voie de 320 m en deux heures environ (soit environ 25.000 cotes relevées en une journée de huit heures). Cet instrument a été conçu en fonction des environnements rencontrés dans les pays en voie de développement, et le constructeur s'est efforcé de le rendre portatif, résistant et autonome.

L'instrument se compose d'une poutre en aluminium de 3 m de longueur, supportée à chaque extrémité par des trépieds réglables servant à la mise à niveau. Un chariot se déplaçant le long de la poutre est en contact avec le sol par l'intermédiaire d'une roue palpeuse de 250 mm de diamètre. L'instrument de mesure situé dans le chariot détecte les déplacements verticaux de la roue palpeuse, les transforme en informations binaires avec une résolution de 1 mm et enregistre les valeurs ainsi obtenues, à des intervalles constants, d'ordinaire 100 mm. Le chariot mobile est déplacé à la main

---

[4] Une alternative récente pour mesurer le profile statique est le "dipstick", un appareil de type inclinometre digital que l'on promène le long de l'empreinte des routes, permettant de mesurer à 300m par heure et un calcul automatique du "IRI". (Edward W. Face Co., Norfolk, Virginia 23508 USA).

d'un bout à l'autre de la poutre à la vitesse de la marche à pied pour relever le profil du segment. Pour obtenir le profil complet d'une trace, on déplace la poutre successivement, de segment de 3 mètres en segment de 3 mètres. L'instrument comporte un micro-ordinateur autonome à piles qui mémorise les données sur une bande magnétique en cassette et calcule automatiquement l'indice des défauts d'uni. Le micro-ordinateur a également été utilisé pour calculer les équations d'étalonnage qui servent ensuite à transformer les données d'un appareil de type-réponse en indice basé sur le profil. Lorsqu'il est programmé pour calculer l'indice IRI, l'analyseur à poutre TRRL peut être rangé dans la classe 1 (conformément au tableau 1) pour toutes les surfaces de routes, sauf les plus lisses. En réglant le gain des circuits électroniques de façon à obtenir une résolution binaire plus fine (0,25 mm), l'instrument peut alors être rangé dans la classe 1 pour toutes les routes, même pour les plus lisses.

Si le micro-ordinateur ne calcule pas directement l'indice IRI, celui-ci doit être évalué à l'aide d'une équation de régression établie expérimentalement, avec en conséquence une précision réduite. Dans ce cas, la poutre doit être considérée comme appartenant à la classe 3 (contrairement à l'appareil de type-réponse, la poutre est stable dans le temps et son "étalonnage par corrélation" n'a pas besoin d'être refait périodiquement comme c'est le cas pour l'appareil de type-réponse).

3.3.3 **L'analyseur de profil en long à inertie APL.** L'analyseur de profil en long (APL) à inertie est conçu pour l'évaluation continue à grande vitesse de 100 à 300 km de route par jour. L'appareil APL se compose d'une remorque spéciale comportant une roue genre roue de bicyclette, un châssis lesté et un pendule spécial à inertie, à basse fréquence, qui sert de référence pseudo-horizontale. La remorque est conçue de façon à être insensible aux mouvements du véhicule mais à être sensible au profil de la trace parcourue dans la bande des fréquences allant de 0,5 à 20 Hz. Lorsqu'elle est tractée à une vitesse constante quelconque entre 50 et 100 km/h, elle capte les défauts d'uni dans toute la gamme des longueurs d'ondes nécessaires au calcul de l'indice IRI. La bande des longueurs d'ondes effectivement captées par l'appareil APL dépend de la vitesse de remorquage : il capte des longueurs d'ondes pouvant atteindre 100 m lorsqu'il est remorqué à 150 km/h, ou se réduisant à 0,3 m lorsque la vitesse n'est que 21,6 km/h.

La remorque APL est le seul analyseur à grande vitesse dont les possibilités de mesurer l'indice IRI dans toute la gamme des défauts d'uni, y compris sur les mauvaises routes non revêtues, ont été démontrées.

Bien que la remorque APL puisse être utilisée pour mesurer l'indice IRI, elle a été mise au point à d'autres fins par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et elle est habituellement utilisée en Europe pour d'autres usages. Elle est normalement pourvue d'instruments de mesure spéciaux en une ou deux configurations : la remorque APL 72 pour les relevés courants et la remorque APL 25 pour les travaux de précision concernant les contrôles de qualité, les réceptions, les évaluations de projets et la recherche.

a) **Remorque APL 72.** Le système APL 72 emploie comme véhicule de traction un break puissant (capable d'effectué 100.000 km par an) pour les essais et les transferts (4). Les systèmes explorant une seule trace de roue sont la norme, bien que des systèmes explorant les deux traces en même temps (deux remorques dont chacune passe dans l'une des traces parcourues) aient été utilisés. En utilisation normale en Europe, la roue de la remorque passe entre les traces. Le signal de profil envoyé par la remorque, la vitesse, la distance parcourue et les commentaires éventuels relatifs aux événements sont enregistrés sur bande magnétique dans le véhicule de traction. Le traitement des données a lieu ultérieurement en laboratoire. Selon les méthodes de traitement traditionnelles, l'état de la route est noté sur 10 en fonction de l'énergie des signaux dans les trois gammes de longueurs d'ondes (1 à 3,3 mètres/cycle, 3,3 à 13 mètres/cycle, et 13 à 40 mètres/cycle).

Les distances entre sites doivent être des multiples de 100 m, avec en général un minimum de 200 m et une longueur normale de 1000 m dans le cas de la remorque APL 72. Il faut prévoir une longueur d'approche suffisante pour les essais à grandes vitesses.

Le système APL 72 peut être aisément adapté pour mesurer l'indice IRI, en traitant différemment en laboratoire les données enregistrées. Il faut se conformer aux instructions du constructeur en ce qui concerne le détail des opérations à effectuer. En laboratoire, les signaux analogiques enregistrés sur la bande doivent être transformés en signaux numériques à l'aide d'un micro-ordinateur standard (qui peut aussi être livré avec le système APL 72, ou que l'on peut se procurer sous des formes diverses dans le commerce). Une fois le signal du profil transformé en informations binaires enregistrées dans le micro-ordinateur, il peut être traité comme n'importe quelles autres données du profil, de la manière exposée à la section 3.4. Quand l'appareil APL 72 est utilisé de cette manière pour mesurer l'indice IRI, il peut être considéré comme appartenant à la classe 2.

b) Appareil APL 25. Le système APL 25 consiste en un véhicule de traction et une seule remorque et il est utilisé à la vitesse de 21,6 km/h (5). Les instruments sont différents de ceux de l'APL 72. L'appareil transforme le signal de profil en signal binaire et enregistre les valeurs numériques sur une bande magnétique en cassette, en même temps qu'un seul indice global des défauts d'uni, appelé CAPL 25 et calculé pour chaque segment de 25 m parcouru.

En raison de la vitesse de remorquage relativement basse utilisée avec l'APL 25, cet appareil n'enregistre pas les grandes longueurs d'ondes qui interviennent cependant dans l'établissement des valeurs de l'indice IRI. L'APL 25 ne peut donc pas être utilisé directement pour mesurer l'indice IRI sans introduire d'erreurs systématiques. Il peut cependant servir à estimer l'indice IRI à l'aide d'équations de régression calculées expérimentalement en vue d'établir un rapport entre l'indice et les mesures que peut fournir l'APL 25. Cette méthode fait alors partie de la classe 3. On ne doit pas s'attendre à ce qu'elle soit aussi précise que les mesures directes faites avec l'APL 72 ou avec d'autres systèmes utilisant la remorque APL à des vitesses supérieures. En conséquence, le système basé sur l'appareil APL 25 n'est pas l'idéal pour rassembler des données en vue de calculer l'indice IRI.

3.3.4 L'analyseur de profil en long à inertie K.J. Law. Ces analyseurs de profil construits aux Etats-Unis d'Amérique par la société K. J. Law Engineers, sont des versions modernes du premier analyseur de profil à inertie type GMR, mis au point dans les années soixante (6). L'analyseur se compose d'un fourgon équipé d'instruments qui mesurent le profil dans les deux traces de roue, au fur et à mesure que le fourgon avance sur la route. Des accéléromètres verticaux fournissent la référence inertielle. La distance par rapport à la surface de la route était mesurée à l'origine par des roues palpeuses mécaniques mais, sur les modèles plus récents, la mesure est prise par des capteurs sans contact (optiques ou acoustiques, selon les modèles). Les signaux de l'accéléromètre sont doublement intégrés pour déterminer la position du corps de l'analyseur de profil. On obtient le profil en ajoutant cette position au signal de position du capteur. Les premiers analyseurs de profil utilisaient des circuits analogiques pour effectuer la double intégration ainsi que d'autres opérations et l'opérateur devait maintenir une vitesse de déplacement constante pendant les mesures. A la fin des années soixante-dix, ce modèle a été modernisé en remplaçant le traitement analogique par un traitement numérique. Avec le passage aux calculs binaires, une nouvelle méthode de calcul a été développée pour rendre la mesure du profil indépendante de la vitesse. Ceci permet d'utiliser l'analyseur plus facilement en étant moins gêné par la circulation.

En outre, ces analyseurs calculent couramment d'autres éléments statistiques sommaires en rapport avec les simulations "quart de voiture" (simulation SQV). A l'origine, les simulations étaient conduites à l'aide du rugosimètre BPR. En 1979, le modèle de simulation SQV utilisé pour l'indice IRI a été ajouté à ces profilomètres et il est en usage depuis cette époque. Ainsi, la possibilité de mesurer l'indice IRI automatiquement est incorporée dans les deux modèles et ceux-ci peuvent être considérés actuellement comme appartenant à la classe 2. Aucun n'a encore été validé à l'aide de la mire et du niveau, bien que la validation soit en cours pour un grand nombre de types de routes revêtues (3).

Il existe actuellement deux versions de l'analyseur de profil :

a) **L'analyseur de profil des routes modèle 690DNC.** Cette version est la plus chère et a les possibilités les plus étendues. Elle comprend le fourgon, l'ensemble des instruments nécessaires à la mesure des profils des deux traces de roue, un mini-ordinateur embarqué, un système d'enregistrement à bande à 9 pistes et différentes options de logiciel pour le calcul de nombreuses valeurs numériques du profil (dont l'indice IRI). La cote de la route est détectée par un capteur sans contact remplaçant les roues palpeuses des versions antérieures par un faisceau de lumière visible.

Le logiciel qui calcule l'indice IRI a été développé au cours du projet NCHRP 1-18 (2) et s'appelle "simulation Maysmeter". Le résultat diffère de l'indice IRI proprement dit en ce sens qu'il est calculé à partir des deux traces de roue (qui simulent une voiture de tourisme avec indicateur de roulance incorporé), au lieu d'une seule. Certains de ces analyseurs de profil peuvent mesurer séparément l'uni des deux traces de roue comme l'exige le calcul de l'indice IRI proprement dit. Si ce n'est pas le cas, le logiciel peut être modifié sans difficulté par le constructeur du matériel. Lorsqu'il est obtenu à partir d'une simulation Maysmeter, l'indice IRI est donné en pouces par mille (inches/mile) plutôt qu'en mètres par kilomètre (1 m/km = 63,36 in/mi).

Les performances du Modèle 690DNC par rapport à un moyen de mesure statique de l'indice IRI n'ont pas encore été validées. Dans le rapport NCHRT 228 (2) les modèles anciens à roues palpeuses mécaniques ont été validés jusqu'aux niveaux de défauts d'uni d'environ 3 m/km sur l'échelle l'indice IRI. Avec les capteurs sans contact, le fonctionnement à des niveaux de défauts d'uni plus élevés devrait être possible. Trois systèmes Modèle 690DNC ont été utilisés lors de la rencontre sur les analyseurs de profil d'Ann Harbor en 1984 (Road Profilometer Meeting), et une validation de cet analyseur doit résulter de cette étude (3). Le Modèle 690DNC n'a pas été essayé sur des routes non revêtues et il est peu probable qu'il le sera dans un proche avenir, car la mesure de l'uni des routes non revêtues ne présente pas grand intérêt actuellement aux Etats-Unis.

b) **L'appareil à mesurer les défauts d'uni modèle 8300.** L'appareil modèle 8300 est un instrument d'analyse de profil sur une seule trace, spécialement conçu pour la mesure de l'indice IRI. Pour réduire le coût de l'appareil, les instruments de mesure ne servent qu'à fournir un signal de profil interne destiné aux calculs de l'indice IRI, ce qui permet de se passer de la plupart des accessoires coûteux, tels que l'ordinateur ou les moyens d'enregistrement, que l'on trouve sur le Modèle 690DNC. Bien que le système soit normalement prévu pour fournir l'IRI, d'autres indices des défauts d'uni peuvent être obtenus en le demandant au constructeur de l'appareil.

Le Modèle 8300 met en oeuvre un ensemble d'instruments monté sur le pare-chocs et comprenant un système de lecture de route à ultra-sons et un accéléromètre vertical. Le système peut être monté sur la plupart des voitures de tourisme. Il n'a pas encore été validé pour la mesure de l'indice IRI, mais il a été utilisé lors de la rencontre sur les analyseurs de profil de 1984 et l'on s'attend à ce que cette étude aboutisse à des renseignements sur sa validité (sur routes revêtues) (3).

3.3.5 Autres analyseurs de profil. Il existe d'autres méthodes d'analyse des profils qui ne sont pas expressément couvertes ici mais qui peuvent néanmoins appartenir à la classe 2. En restant dans le cadre des règles générales exposées ici, et en suivant les instructions du constructeur, on peut utiliser ces méthodes pour obtenir des données relatives au profil et calculer l'indice IRI comme il est indiqué plus loin à la section 3.4. Il se peut cependant que certains instruments appelés analyseurs de profil (par exemple, les règles roulantes) ne puissent fournir un signal de profil dont la gamme d'ondes et la précision soient suffisantes pour calculer l'indice IRI. S'ils ne peuvent pas être utilisés pour mesurer les profils en vue du calcul de l'indice IRI, ces appareils ne peuvent être rangés que dans la classe 3, même s'ils sont stables dans le temps.

3.4 Calcul de l'indice IRI

3.4.1 Equations. L'indice IRI s'obtient en calculant quatre variables qui sont des fonctions du profil mesuré (ces quatre variables simulent la réponse dynamique d'un véhicule de référence circulant sur le profil mesuré). Les équations des quatre variables sont résolues pour chacune des cotes relevés, sauf au premier point de relèvement. La pente moyenne sur les 11 premiers mètres (0,5 sec à 80 km/h) sert à affecter les valeurs initiales suivantes aux variables :

$$Z_1' = Z_3' = (Y_a - Y_1) / 11 \qquad (1)$$

$$Z_2' = Z_4' = 0 \qquad (2)$$

$$a = 11 / dx + 1 \qquad (3)$$

dans lesquelles Y_a représente le "$a^{ème}$" point de la cote du profil, Y_1 le premier point et dx l'intervalle choisi (ainsi, dans l'équation (1), pour un intervalle dx = 0,25 m, on utilise la différence entre la cote du 45ème point et celle du premier point pour déterminer une pente initiale destinée au calcul de l'indice IRI).

Les quatre équations récurrentes suivantes sont alors résolues pour chacune des cotes, de 2 à n (n = nombre de cotes mesurées) :

$$Z_1 = s_{11} * Z_1' + s_{12} * Z_2' + s_{13} * Z_3' + s_{14} * Z_4' + p_1 * Y' \qquad (4)$$

$$Z_2 = s_{21} * Z_1' + s_{22} * Z_2' + s_{23} * Z_3' + s_{24} * Z_4' + p_2 * Y' \qquad (5)$$

$$Z_3 = s_{31} * Z_1' + s_{32} * Z_2' + s_{33} * Z_3' + s_{34} * Z_4' + p_3 * Y' \qquad (6)$$

$$Z_4 = s_{41} * Z_1' + s_{42} * Z_2' + s_{43} * Z_3' + s_{44} * Z_4' + p_4 * Y' \qquad (7)$$

cù

$$Y' = (Y_i - Y_{i-1}) / dx = \text{pente introduite} \qquad (8)$$

et

$$Z_j' = Z_j \text{ à partir de la position précédente, } j = 1,4 \qquad (9)$$

et s_{ij} et p_j sont des coefficients déterminés pour un intervalle dx donné entre les points de relèvement des cotes. Ainsi, les équations (4) à (7) sont résolues pour chacune des cotes relevées sur la trace de roue. Après avoir résolu les équations pour une cote, on utilise l'équation (9) pour remettre les valeurs de Z_1', Z_2', Z_3' et Z_4' au point de départ pour la cote suivante. En outre, pour chacune des positions de relèvement de la cote, la pente rectifiée RS (rectified slope) du profil filtré est calculée de la manière suivante :

$$RS_i = | Z_3 - Z_1 | \qquad (10)$$

L'indice IRI est la moyenne statistique de la variable RS sur la longueur du site. Ainsi, après résolution des équations ci-dessus pour toutes les cotes du profil, l'indice IRI est calculé à l'aide de l'équation finale suivante :

$$IRI = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=2}^{n} RS_i$$

Le calcul ci-dessus est valable pour tout intervalle dx entre 0,25 m et 0,61 m (2,0 pieds). Pour les intervalles plus courts, il est recommandé en plus, de lisser le profil en faisant des moyennes afin de mieux représenter la manière dont le pneumatique d'un véhicule épouse le sol. La longueur de référence pour faire la moyenne est 0,25 m. L'indice IRI peut alors être calculé de l'une des deux manières suivantes :

1) On peut faire la moyenne des cotes relevées dans l'intervalle de 0,25 m pour obtenir une cote équivalente du profil, correspondant à cet intervalle de 0,25 m. On calcule ensuite l'indice IRI à l'aide des équations ci-dessus, en se basant sur un intervalle de 0,25 m, à l'aide des coefficients prévus pour cet intervalle.

2) On peut également faire une "moyenne mobile" de tous les points d'un intervalle de 0,25 m centré sur le point de relèvement de la cote du profil. Ensuite, l'indice IRI est calculé en résolvant les équations pour chacun des points pour lesquels la moyenne a été faite, à l'aide des coefficients des équations correspondant à l'intervalle plus petit.

L'algorithme utilisé dans le programme-exemple de la figure 3 (section 3.4.2) est valable pour toute longueur de référence entre 10 et 610 mm. Lorsque dx est inférieur à 0,25 m, cet algorithme applique la moyenne mobile correspondant aux données introduites.

Le résultat du calcul de l'indice IRI est donné dans les unités correspondant à celles utilisées pour la mesure des cotes et pour l'intervalle entre les points de relèvement. Par exemple, si les cotes sont mesurées en mm et que l'unité de dx est le mètre, l'indice IRI sera donné de préférence en mm/m = m/km = pente x 10^3.

3.4.2 Programme de démonstration pour le calcul de l'indice IRI. Un programme de démonstration du calcul de l'indice IRI par la méthode ci-dessus est donnée à la figure 3. Ce programme est écrit en BASIC et peut être exécuté sur n'importe quel micro-ordinateur. Cependant, certaines commandes en BASIC varient quelque peu selon les ordinateurs et il peut être nécessaire de modifier quelques instructions (ce programme a été exécuté sans modifications sur les ordinateurs des familles Apple II, Apple MacIntosh et IBM PC). L'algorithme utilisé dans le programme comporte un lissage pour les petits intervalles entre les points de relèvement et il reste valable pour n'importe quel intervalle entre 10 et 610 mm.

On a choisi le langage BASIC parce que c'est le plus répandu sur les petits ordinateurs et il peut être compris par des personnes n'ayant que peu ou pas de connaissances en programmation. Cependant, il n'est pas très rapide ni performant pour le calcul de l'indice IRI. Il pourrait donc être intéressant de le traduire en un langage plus efficace (le FORTRAN ferait très bien l'affaire) pour réaliser des gains de temps considérables. Les commandes BASIC figurent dans la liste en caractères gras; les mentions en caractères ordinaires représentent les commentaires, les variables et les constantes.
Le programme commence par fixer les valeurs des constantes, aux lignes 1040 à 1140. DX représente l'intervalle entre les points de relèvement et les valeurs doivent être données obligatoirement en

Figure 3. Programme de démonstration pour le calcul de l'indice IRI à l'aide d'un microordinateur.

```
1000 REM    Ce programme fait la démonstration du calcul
1010 REM    de l'indice IRI. Un certain nombre de modifications
1020 REM    recommandées sont exposées dans le texte.
1030 REM ------------------------------------- Initialisation des constantes
1040    DIM Y(26),Z(4),Z1(4),ST(4,4),PR(4)
1050    READ DX
1060    K = INT (.25 / DX + .5) + 1
1070    IF K < 2 THEN K = 2
1080    BL = (K - 1) * DX
1090    FOR I = 1 TO 4
1100        FOR J = 1 TO 4
1110            READ ST(I,J)
1120        NEXT J
1130        READ PR(I)
1140    NEXT I
1150 REM ------------------------------------ Initialisation des variables
1160    INPUT "Cote du profil à 11 m du point de départ", Y(K)
1170    INPUT X = 0. Cote = ", Y(1)
1180    Z1(1) = (Y(K) - Y(1)) / 11
1190    Z1(2) = 0
1200    Z1(3) = Z1(1)
1210    Z1(4) = 0
1220    RS = 0
1230    IX = 1
1240    I = 0
1250 REM ------------- Boucle pour introduire le profil et calculer l'uni
1260    I = I + 1
1270    PRINT "X = ";IX * DX,
1280    IX = IX + 1
1290    INPUT "Elev. = "; Y(K)
1300 REM --------------------------------------- Calcul de la pente à introduire
1310    IF IX < K THEN Y(IX) = Y(K)
1320    IF IX < K THEN GOTO 1270
1330        YP = (Y(K) - Y(1)) / BL
1340        FOR J = 2 TO K
1350            Y(J-1) = Y(J)
1360        NEXT J
1370 REM ---------------------------------- Simulation de la réponse du véhicule
1380    FOR J = 1 TO 4
1390        Z(J) = PR(J) * YP
1400        FOR JJ = 1 TO 4
1410            Z(J) = Z(J) + ST(J,JJ) * Z1(JJ)
1420        NEXT JJ
1430    NEXT J
1440    FOR J = 1 TO 4
1450        Z1(J) = Z(J)
1460    NEXT J
1470    RS = RS + ABS (Z(1) - Z(3))
1480    PRINT "disp = ";RS * DX, "IRI = ";RS / I
1490    GOTO 1260
1500 END
1510 DATA .25
1520 DATA .9966071 , .01091514,-.002083274 , .0003190145 , .005476107
1530 DATA -.5563044 , .9438768 ,-.8324718 , .05064701 , 1.388776
1540 DATA .02153176 , .002126763 , .7508714 , .008221888 , .2275968
1550 DATA 3.335013 , .3376467 ,-39.12762 , .4347564 , 35.79262
```

mètres. L'ensemble ST représente la matrice de transfert d'état qui comporte les coefficients s_{ij} des équations (4) à (7) et PR comporte les coefficients p_j utilisés dans ces équations. Les valeurs de DX et des 20 coefficients ST et PR se trouvent dans les instructions **DATA**, à la fin du programme, aux lignes 1510 à 1550. K est le nombre de points du profil utilisés pour calculer la pente à introduire et BL représente la longueur de référence. Lorsque DX est supérieur à 0,25 m, 2 points cotés servent à calculer la pente (équation 8) et la longueur de référence est nécessairement égale à DX. Pour les valeurs inférieures de DX, K peut être supérieur à 2 et le lissage de la moyenne mobile est inclus dans le calcul de la pente. Si l'on utilise un intervalle différent, les lignes 1510 à 1550 doivent être remplacées de façon à indiquer l'intervalle choisi et les coefficients correspondants (ces coefficients peuvent être copiés à partir du tableau 2 ou calculés par le programme donné à la figure 4).

Les variables utilisées dans le programme sont les quatre variables relatives au véhicule et mémorisées dans l'ensemble Z (Z_1, Z_2, Z_3 et Z_4 des équations 1 à 7), les valeurs précédentes mémorisées dans l'ensemble Z1 (Z_1', Z_2', Z_3' et Z_4' des équations 1 à 7), la pente rectifiée accumulée RS et les compteurs IX et I. Lorsque DX est supérieur à 0,25 m, les compteurs IX et I sont égaux et proportionnels à la distance parcourue.

Les lignes 1260 à 1360 servent à calculer la pente à introduire à partir des cotes reçues. L'ensemble Y est une mémoire intermédiaire utilisée pour la mise en mémoire temporaire des cotes des points de relèvement du profil (jusqu'à 26). Cependant, seuls les premiers éléments K sont utilisés. Ainsi, lorsque DX est égal ou supérieur à 0,25 m, ce qui se produit dans la plupart des cas où le profil est mesuré manuellement, K = 2 et seuls les deux premiers éléments de l'ensemble Y sont utiles. Cependant, quand les intervalles entre les points de relèvement sont très courts, on a besoin de la mémoire tampon Y pour la moyenne mobile. Lorsque DX = 0,01 m, les 26 éléments de la mémoire intermédiaire sont tous utilisés.

Les lignes 1380 à 1490 sont des traductions directes des équations (4) à (10).

Une importante modification recommandée pour rendre le programme plus pratique consiste à permettre la lecture du profil mesuré à partir d'un disque ou d'une bande magnétique. Les structures des fichiers étant différentes selon les machines, le programme de démonstration présenté ici n'est pas prévu pour cela (il demande que l'utilisateur introduise successivement les cotes du profil). Les lignes 1160, 1170, 1280 et 1290 peuvent être remplacées par des lignes équivalentes permettant de rechercher les données dans les fichiers mis en mémoire.

Des renseignements supplémentaires concernant les caractéristiques de la référence et cette méthode de calcul peuvent être obtenus facilement (1 et 2).

3.4.3 Tableaux des coefficients pour les équations de l'indice IRI. Les coefficients à utiliser dans les équations (4) à (7) et dans le programme de démonstration du calcul de l'indice IRI dépendent de l'intervalle entre les mesures de cotes. Le tableau 2 donne les coefficients correspondant aux intervalles courants utilisés dans les mesures manuelles des profils. Lorsqu'on utilise un intervalle non compris dans la table, les coefficients peuvent être calculés au moyen de l'algorithme donné à la figure 4 de la section 3.4.4.

3.4.4 Programme de calcul des coefficients pour les équations de l'indice IRI. Les coefficients à utiliser dans les équations (4) à (7) peuvent être déterminés pour n'importe quels intervalles choisis à l'aide du programme donné à la figure 4. Le langage utilisé est le BASIC, comme dans la discussion de la section 3.4.2. Les détails de la simulation du véhicule sont décrits par ailleurs (1) et seules les équations réellement utilisées dans le programme sont incluses ici.

Tableau 2. Coefficients pour les équations de l'IRI

dx = 50 mm, dt = .00225 sec

	.9998452	2.235208E-03	1.062545E-04	1.476399E-05		4.858894E-05
ST =	-.1352583	.9870245	7.098568E-02	1.292695E-02	**PR** =	6.427258E-02
	1.030173E-03	9.842664E-05	.9882941	2.143501E-03		1.067582E-02
	.8983268	8.617964E-02	-10.2297	.9031446		9.331372

dx = 100 mm, dt = .0045 sec

	.9994014	4.442351E-03	2.188854E-04	5.72179E-05		3.793992E-04
ST =	-.2570548	.975036	7.966216E-03	2.458427E-02	**PR** =	.2490886
	3.960378E-03	3.814527E-04	.9548048	4.055587E-03		4.123478E-02
	1.687312	.1638951	-19.34264	.7948701		17.65532

dx = 152.4 mm (0.50 ft), dt = .006858 sec

	.9986576	6.727609E-03	3.30789E-05	1.281116E-04		1.309621E-03
ST =	-.3717946	.9634164	-.1859178	3.527427E-02	**PR** =	.5577123
	8.791381E-03	8.540772E-04	.8992078	5.787373E-03		9.200091E-02
	2.388208	.2351618	-27.58257	.6728373		25.19436

dx = 166.7 mm, dt = .0075015 sec

	.9984089	7.346592E-03	-1.096989E-04	1.516632E-04		1.70055E-03
ST =	-.4010374	.9603959	-.2592032	3.790333E-02	**PR** =	.6602406
	1.038282E-02	1.011088E-03	.8808076	6.209313E-03		.1088096
	2.556328	.2526888	-29.58754	.6385015		27.03121

dx = 200 mm, dt = .009 sec

	.9977588	8.780606E-03	-6.436089E-04	2.127641E-04		2.885245E-03
ST =	-.4660258	.9535856	-.4602074	4.352945E-02	**PR** =	.9262331
	1.448438E-02	1.418428E-03	.8332105	7.105564E-03		.1523053
	2.908761	.2901964	-33.84164	.5574984		30.93289

dx = 250 mm, dt = .01125 sec

	.9966071	1.091514E-02	-2.083274E-03	3.190145E-04		5.476107E-03
ST =	-.5563044	.9438768	-.8324718	5.064701E-02	**PR** =	1.388776
	2.153176E-02	2.126763E-03	.7508714	8.221888E-03		.2275968
	3.335013	.3376467	-39.12762	.4347564		35.79262

dx = 304.8 mm (1.00 ft), dt = .013716 sec

	.9951219	1.323022E-02	-4.721649E-03	4.516408E-04		9.599989E-03
ST =	-.6468806	.9338062	-1.319262	5.659404E-02	**PR** =	1.966143
	3.018876E-02	3.010939E-03	.6487856	9.129263E-03		.3210257
	3.661957	.3772937	-43.40468	.3016807		39.74273

dx = 333.3 mm, dt = .0149985 sec

	.9942636	1.442457E-02	-6.590556E-03	5.25773E-04		1.232715E-02
ST =	-.6911992	.9287472	-1.597666	5.892596E-02	**PR** =	2.288865
	3.496214E-02	3.505154E-03	.5920432	9.472713E-03		.3729946
	3.775608	.3928397	-45.01348	.2341656		41.23787

dx = 500 mm, dt = .0225 sec

	.9881727	2.128394E-02	-2.520931E-02	9.923165E-04		3.703847E-02
ST =	-.928516	.9001616	-3.391369	6.280167E-02	**PR** =	4.319885
	6.386326E-02	6.615445E-03	.2402896	9.862685E-03		.6958473
	3.743294	.4186779	-46.67883	-.1145251		42.93555

dx = 609.6 mm (2.00 ft), dt = .027432 sec

	.9832207	2.567633E-02	-.0448194	1.291335E-03		6.159972E-02
ST =	-1.080368	.8808161	-4.541246	5.758515E-02	**PR** =	5.621614
	8.111078E-02	8.608906E-03	2.055522E-02	8.861093E-03		.898334
	3.194438	.3839011	-41.76972	-.2822351		38.57529

Figure 4. Programme de calcul des coefficients des équations de l'indice IRI à l'aide d'un micro-ordinateur.

```
1000  REM   Ce programme calcule les coefficients nécessaires pour la simulation
1010  REM   du véhicule de référence avec lequel l'indice IRI est calculé.
1020  REM
1030  REM   Résume les constantes du véhicule (taux hydrolastiques, masses, amortisseur)
1040  REM
1050     N = 4
1060     K1 = 653
1070     K2 = 63.3
1080     MU = .15
1090     C = 6
1100    DIM A(4,4), ST(4,4), PR(4), A1(4,4), A2(4,4), IC(4), JC(4), Y(4)
1110  REM
1120  REM    Recherche intervalle entre les points de relèvement et
1130  REM    convertit en intervalle de temps à 80 Km/h
1140     PRINT
1150     INPUT "Intervalle entre les points de relèvement (mm) = ";MM
1160         V = 80
1170         T = MM / V * 0.0036
1180     PRINT
1190     PRINT "*** Intervalle de temps = ";T;" sec"
1200  REM
1210  REM   Forme la matrice "A" à partir des paramètres
1215  REM   du véhicule et résume la matrice "ST".
1220  REM
1230      FOR I = 1 TO 4
1240          FOR J = 1 TO 4
1250             A(J,I) = 0
1260             A1(J,I) = 0
1270             ST(I,J) = 0
1280          NEXT J
1290         A1(I,I) = 1
1300         ST(I,I) = 1
1310     NEXT I
1320     A(1,2) = 1
1330     A(3,4) = 1
1340     A(2,1) =  - K2
1350     A(2,2) =  - C
1360     A(2,3) = K2
1370     A(2,4) = C
1380     A(4,1) = K2 / MU
1390     A(4,2) = C / MU
1400     A(4,3) =  - (K1 + K2) / MU
1410     A(4,4) = - C / MU
1420  REM
1430  REM   Calcule la matrice de transfert d'état "ST" en utilisant le
1440  REM   développement en série de Taylor. La variable "IT" compte les
1450  REM   itérations dans la série. La variable "IS" est utilisée pour indiquer
1460  REM   quand la série a convergé (IS = 1 veut dire qu'aucune modification n'est
1470  REM   intervenue dans "ST" pendant l'itération en cours).
1475  REM
```

Figure 4 (suite).

```
1480    IT = 0
1490    IT = IT + 1
1500    IS = 1
1510    FOR J = 1 TO N
1520        FOR I = 1 TO N
1530            A2(I,J) = 0
1540            FOR K = 1 TO N
1550                A2(I,J) = A2(I,J) + A1(I,K) * A(K,J)
1560             NEXT K
1570        NEXT I
1580     NEXT J
1590     FOR J = 1 TO N
1600        FOR I = 1 TO N
1610            A1(I,J) = A2(I,J) * T / IT
1620            IF ST(I,J) = ST(I,J) + A1(I,J) THEN  GOTO 1650
1630            ST(I,J) = ST(I,J) + A1(I,J)
1640            IS = 0
1650         NEXT I
1660     NEXT J
1670     IF IS = 0 THEN  GOTO 1490
1680     PRINT
1690     PRINT "MATRICE DE TRANSFERT D'ETAT"
1700     PRINT
1710     FOR J = 1 TO N
1720         FOR I = 1 TO N
1730             PRINT ST(J,I),
1740         NEXT I
1750         PRINT
1760     NEXT J
1770 REM
1780 REM Le code suivant est une routine d'inversion de matrice.  ER est le seuil d'erreur
1790 REM qui peut être utilisé pour indiquer la singularité.
1800 REM
1810     ER = 0
1820     FOR KK = 1 TO N
1830         KD = KK - 1
1840         PV = 0
1850         FOR I = 1 TO N
1860             FOR J = 1 TO N
1870                 IF KK = 1 THEN 1930
1880                 FOR II = 1 TO KD
1890                     FOR JJ = 1 TO KD
1900                        IF I = IC(II) OR J = JC(JJ) THEN GOTO 1970
1910                     NEXT JJ
1920                 NEXT II
1930                 IF  ABS (A(I,J)) <  =  ABS (PV) THEN  GOTO 1970
1940                 PV = A(I,J)
1950                 IC(KK) = I
1960                 JC(KK) = J
1970             NEXT J
```

Figure 4. (suite).

```
1980        NEXT I
1990        IF  ABS (PV) > ER THEN  2020
2000            PRINT "PIVOT < ";ER
2010            STOP
2020        II = IC(KK)
2030        JJ = JC(KK)
2040        FOR J = 1 TO N
2050            A(II,J) = A(II,J) / PV
2060        NEXT J
2070        A(II,JJ) = 1 / PV
2080         FOR I = 1 TO N
2090            AA = A(I,JJ)
2100            IF I = II THEN 2150
2110                A(I,JJ) =  - AA / PV
2120                FOR J = 1 TO N
2130                    IF J <  > JJ THEN A(I,J) = A(I,J) - AA * A(II,J)
2140                NEXT J
2150         NEXT I
2160     NEXT KK
2170     FOR J = 1 TO N
2180         FOR I = 1 TO N
2190             Y(JC(I)) = A(IC(I),J)
2200         NEXT I
2210         FOR I = 1 TO N
2220             A(I,J) = Y(I)
2230         NEXT I
2240     NEXT J
2250     FOR I = 1 TO N
2260         FOR J = 1 TO N
2270             Y(IC(J)) = A(I,JC(J))
2280         NEXT J
2290         FOR J = 1 TO N
2300             A(I,J) = Y(J)
2310         NEXT J
2320     NEXT I
2330 REM
2340 REM     Calcule la matrice de Réponse Particulière.
2350 REM
2360     PRINT
2370     PRINT "PR MATRIX:"
2380     PRINT
2390     FOR I = 1 TO N
2400         PR(I) =  - A(I,4)
2410         FOR J = 1 TO N
2420             PR(I) = PR(I) + A(I,J) * ST(J,4)
2430         NEXT J
2440         PR(I) = PR(I) * K1 / MU
2450         PRINT PR(I)
2460     NEXT I
2470 END
```

Les coefficients utilisés aux équations (4) à (7) sont dérivés des propriétés dynamiques du modèle du véhicule de référence. Ces propriétés dynamiques sont représentées par quatre équations différentielles, dont la matrice a la forme suivante :

$$dz(t)/dt = \underline{A} * z(t) + \mathbf{B} * y(t) \tag{12}$$

où z est un vecteur contenant les quatre variables des équations (1) à (7); $\underline{A}$ est une matrice 4 x 4 qui décrit la dynamique du modèle; **B** est un vecteur 4 x 1 qui décrit la manière dont le profil réagit avec le véhicule; et y(t) est le profil introduit, tel qu'il est perçu par le véhicule en déplacement. Ces matrices $\underline{A}$ et B sont définies dans le tableau 2.

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_2 & -C & K_2 & C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ K_2 / u & C / u & -(K_1 + K_2)/u & -C/u \end{bmatrix} \qquad \mathbf{B} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_1/u \end{Bmatrix} \tag{13}$$

Les quatre constantes K1, K2, C et u sont des paramètres du véhicule dont les valeurs sont K1=653., K2=63,3, C=6, et u=0,15. Les coefficients s des équations (4) à (7) constituent une matrice de transfert d'état calculée à partir de la matrice $\underline{A}$, de la façon suivante :

$$\underline{ST} = e^{\underline{A} * dt} \tag{14}$$

Le programme de la figure 4 calcule les coefficients pour les valeurs de la matrice s (appelée ST dans le programme) en utilisant un développment en série de Taylor de l'équation (13) :

$$\underline{ST} = \underline{I} + \underline{A} * dt + \underline{A} * \underline{A} * dt^2 / 2! + \underline{A}^3 * dt^3 / 3! + ... \tag{15}$$

Le programme continue à additionner les termes de l'équation (15) jusqu'à ce que les 16 éléments de la matrice ST atteignent la précision permise par les limites de l'ordinateur.

Les quatre coefficients p restants constituent la matrice de réponse partielle qui est définie comme :

$$PR = \underline{A}^{-1} (\underline{ST} - \underline{I}) * \mathbf{B} \tag{16}$$

Le programme utilise la méthode d'élimination de Gauss pour inverser la matrice $\underline{A}$ en résolvant l'équation (16) pour les quatre éléments de la matrice **PR.**

3.4.5 Test de vérification des calculs. Pour vérifier la validité d'une méthode de calcul de l'indice IRI à partir du profil, il faut introduire le profil simple de la figure 5. Ce profil se compose d'une impulsion triangulaire unique. Elle commence à une distance x = 1 m, s'élève jusqu'à la cote 2 pour x = 3 m, puis revient à 0 pour x = 5 m. Le résultat du calcul de l'indice IRI est également montré. L'indice IRI résultant d'une moyenne, sa valeur diminue quand aucune dénivellation n'est introduite, comme le montre la figure (remarquons que l'échelle de gauche sert pour les deux courbes de déplacement alors que l'indice IRI utilise l'échelle de droite pour la pente). La déflection accumulée est également montrée et elle est aussi imprimée par le programme de démonstration du calcul de l'indice IRI donné à la figure 3. Finalement, le déplacement finit par atteindre une valeur

Figure 5. Profil spécial à introduire pour vérifier le programme de calcul de l'indice IRI.

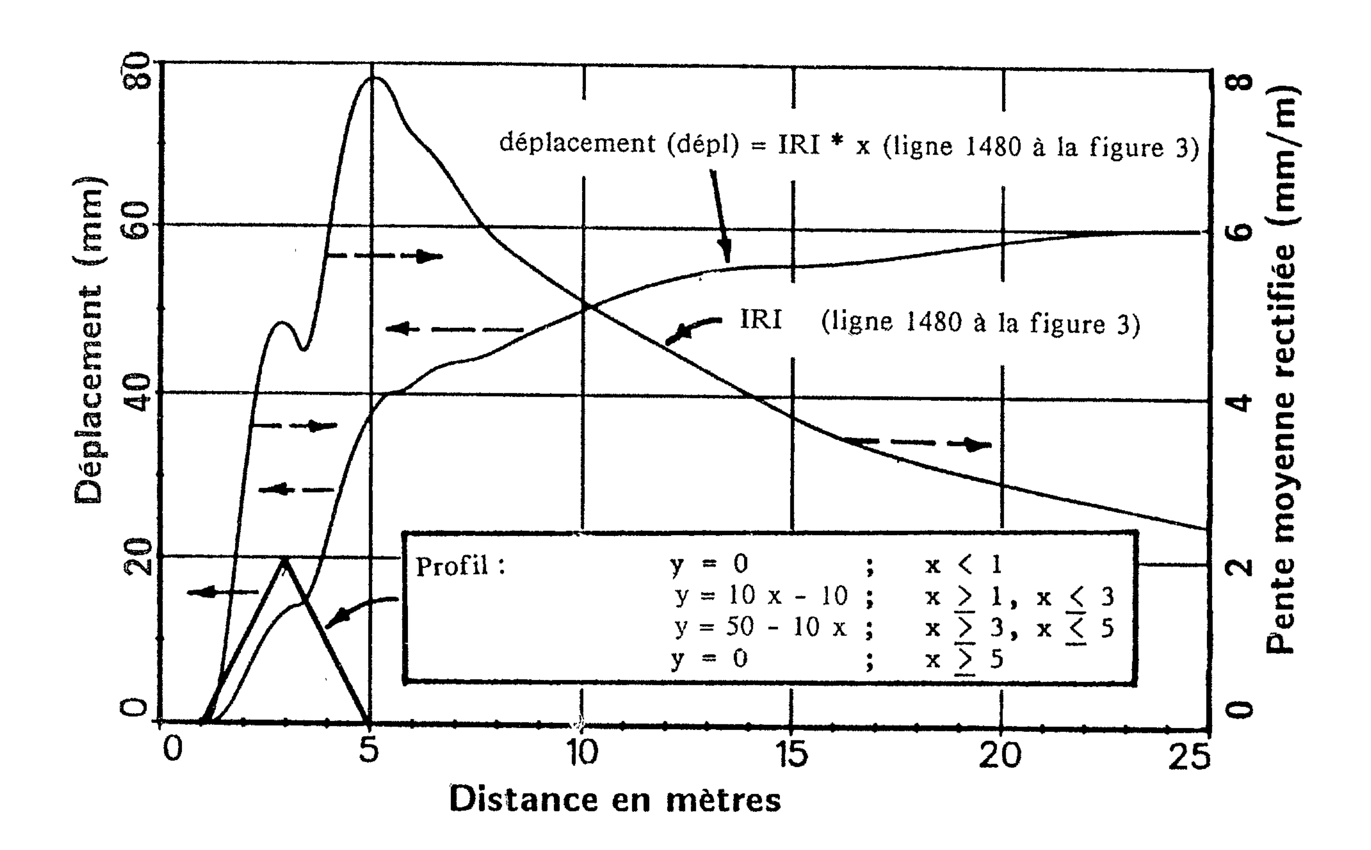


Tableau 3. Résultats donnés par l'algorithme de calcul de l'indice IRI pour vérifier les données introduites représentées à la figure 5

dx = 0,25 m
x = distance en mètres; déplacement (dépl) = IRI * x, en mm.

x	dépl	IRI	x	dépl	IRI	x	dépl	IRI
0.25	0.00000	0.00000	10.25	51.40230	5.01486	20.25	59.18477	2.92270
0.50	0.00000	0.00000	10.50	51.91214	4.94401	20.50	59.33165	2.89423
0.75	0.00000	0.00000	10.75	52.38925	4.87342	20.75	59.46859	2.86596
1.00	0.00000	0.00000	11.00	52.83116	4.80283	21.00	59.59516	2.83786
1.25	0.55530	0.44424	11.25	53.23877	4.73233	21.25	59.71099	2.80993
1.50	2.20233	1.46822	11.50	53.61410	4.66210	21.50	59.81583	2.78213
1.75	4.73057	2.70318	11.75	53.95850	4.59221	21.75	59.90954	2.75446
2.00	7.54760	3.77380	12.00	54.27196	4.52266	22.00	59.99203	2.72691
2.25	10.07902	4.47956	12.25	54.55337	4.45334	22.25	60.06335	2.69948
2.50	12.01384	4.80554	12.50	54.80136	4.38411	22.50	60.12359	2.67216
2.75	13.34387	4.85232	12.75	55.01498	4.31490	22.75	60.17294	2.64496
3.00	14.25540	4.75180	13.00	55.19409	4.24570	23.00	60.21163	2.61790
3.25	14.64586	4.50642	13.25	55.33940	4.17656	23.25	60.24000	2.59097
3.50	17.25782	4.93081	13.50	55.45210	4.10756	23.50	60.25841	2.56419
3.75	21.63001	5.76800	13.75	55.53360	4.03881	23.75	60.26729	2.53757
4.00	26.62478	6.65619	14.00	55.58533	3.97038	24.00	60.26746	2.51114
4.25	31.17282	7.33478	14.25	55.60862	3.90236	24.25	60.27618	2.48562
4.50	34.71439	7.71431	14.50	55.61244	3.83534	24.50	60.29289	2.46093
4.75	37.25397	7.84294	14.75	55.64196	3.77234	24.75	60.31701	2.43705
5.00	39.14653	7.82931	15.00	55.69562	3.71304	25.00	60.34795	2.41392
5.25	40.25332	7.66730	15.25	55.77170	3.65716	25.25	60.38510	2.39149
5.50	40.30715	7.32857	15.50	55.86834	3.60441	25.50	60.42782	2.36972
5.75	41.03986	7.13737	15.75	55.98361	3.55451	25.75	60.47548	2.34856
6.00	42.07087	7.01181	16.00	56.11554	3.50722	26.00	60.52746	2.32798
6.25	42.98489	6.87758	16.25	56.26218	3.46229	26.25	60.58311	2.30793
6.50	43.59367	6.70672	16.50	56.42163	3.41949	26.50	60.64183	2.28837
6.75	43.93293	6.50858	16.75	56.59200	3.37863	26.75	60.70300	2.26927
7.00	44.16159	6.30880	17.00	56.77141	3.33949	27.00	60.76602	2.25059
7.25	44.44368	6.13016	17.25	56.95805	3.30192	27.25	60.83034	2.23231
7.50	44.87153	5.98287	17.50	57.15011	3.26572	27.50	60.89539	2.21438
7.75	45.44893	5.86438	17.75	57.34588	3.23075	27.75	60.96065	2.19678
8.00	46.11967	5.76496	18.00	57.54367	3.19687	28.00	61.02563	2.17949
8.25	46.81218	5.67420	18.25	57.74189	3.16394	28.25	61.08987	2.16247
8.50	47.47456	5.58524	18.50	57.93907	3.13184	28.50	61.15292	2.14572
8.75	48.08815	5.49579	18.75	58.13378	3.10047	28.75	61.21438	2.12920
9.00	48.66155	5.40684	19.00	58.32473	3.06972	29.00	61.27390	2.11289
9.25	49.21490	5.32053	19.25	58.51073	3.03952	29.25	61.33114	2.09679
9.50	49.76499	5.23842	19.50	58.69067	3.00978	29.50	61.38580	2.08087
9.75	50.31748	5.16077	19.75	58.86356	2.98043	29.75	61.43763	2.06513
10.00	50.86700	5.08670	20.00	59.02852	2.95143	30.00	61.48640	2.04955

constante. Les résultats donnés sur la figure sont aussi donnés au tableau 3 pour des intervalles de 0,25 m (ce tableau a été produit en utilisant le programme de démonstration du calcul de l'indice IRI de la figure 3, avec un intervalle de 250 mm entre les points de relèvement des cotes).

Cette vérification ne peut servir qu'à confirmer la validité de la méthode de calcul de l'indice IRI. Il ne s'agit en aucun cas d'un "étalonnage". C'est-à-dire que si les résultats obtenus par une méthode de calcul sont trop élevés de 10 %, la vérification ne peut pas servir à les corriger pour donner l'indice IRI. Au lieu de cela, il faut chercher et corriger l'erreur de calcul. Bien que la méthode de calcul de l'indice IRI utilisée dans ce programme de démonstration soit relativement peu sensible au choix de l'intervalle entre les points de relèvement, il existe de petites différences et il ne faut pas s'attendre à une concordance exacte avec les valeurs du tableau 3, à moins que le même intervalle de 0,25 m ne soit utilisé. Cependant, ces différences devraient être relativement faibles (moins de 1 %).

CHAPITRE 4

EVALUATION D'UN INDICE IRI A L'AIDE D'UN APPAREIL DE TYPE-REPONSE ETALONNE (CLASSE 3)

L'appareil de type-réponse est de loin le plus répandu dans le monde. Il convient parfaitement au rassemblement rapide et peu coûteux de données sur l'uni des routes, à raison de 200 à 300 km par jour, en relevé continu. L'échelle de référence des défauts d'uni, ou indice IRI, a été conçue de façon à rendre compte de la réponse d'un appareil de type-réponse "idéal" normalisé.

Afin que les données obtenues à partir d'un appareil de type-réponse soient cohérentes, il faut veiller à ce que les propriétés mécaniques du véhicule (et de l'indicateur de roulance) restent constantes, grâce à de saines pratiques d'entretien et d'utilisation. Tous les changements d'état du véhicule se répercutent sur les mesures de l'uni. Afin de choisir et d'entretenir judicieusement le véhicule à utiliser dans un appareil de type-réponse, l'utilisateur doit donc être au courant de tous les facteurs qui ont une influence sur les performances du système. Ces facteurs sont donnés dans la section 4.1.

Un problème que pourraient présenter les appareils de type-réponse concerne les différences de réponse aux défauts d'uni des routes d'un système à un autre. En effet, aucun appareil de type-réponse ne fournit des données exactement semblables. Il est donc nécessaire de ramener toutes les mesures à une échelle normalisée (IRI) par des relations établies au moment de l'étalonnage, comme il est expliqué dans la section 4.2.

Afin que toutes les mesures effectuées au fil des jours restent cohérentes, il faut mettre en oeuvre des procédures de contrôle destinées à limiter les changements de performance du système. On trouvera dans la section 4.3 les méthodes à utiliser lors des tests de contrôle, ainsi que les procédures à observer pour que les mesures conservent leur valeur le temps.

4.1 Choix et entretien d'un appareil de type-réponse

Un appareil de type-réponse se compose de trois éléments : le véhicule, le transducteur qui capte les mouvements relatifs de la suspension, et l'unité d'affichage reliée électriquement au transducteur. L'ensemble transducteur-unité d'affichage s'appelle indicateur de roulance et il est vendu comme ensemble inséparable. La mesure fournie par l'indicateur de roulance est en fait la réponse du véhicule aux défauts d'uni de la route parcourue à une vitesse donnée. La mesure est donc influencée par un certain nombre de facteurs concernant l'état de l'indicateur de roulance, le mode opératoire, le véhicule et tous les autres facteurs ayant une influence sur les réponses du véhicule.

4.1.1 L'indicateur de roulance. On connaît les indicateurs de roulance sous divers noms, à savoir : ride meters, Mays Meters (Rainhart Company, Etats-Unis), Bump Integrators ou intégrateurs de vibrations (TRRL, Royaume-Uni), NAASRA Meters (ARRB, Australie), Cox Meters (James Cox Company, Etats- Unis), PCA Meters, etc. Malgré ces différents noms et l'incompatibilité des techniques d'utilisation, la plupart sont fonctionnellement équivalents, quand ils sont utilisés dans les conditions pour lesquelles ils ont été prévus (1 et 2).

Lors d'un essai, l'indicateur de roulance prend un certain nombre de mesures. Chacune de ces mesures correspond à une certaine amplitude du mouvement de la suspension. La somme de ces

mesures qui peut ou non être effectuée par l'indicateur de roulance, donne une valeur proportionnelle au total des mouvements de la suspension pendant l'essai. Cette valeur, divisée par la longueur du segment de route examiné donne un quotient de pente appelé pente moyenne rectifiée (PMR) (Average Rectified Slope ou ARS).

Lors du choix d'un indicateur de roulance il est nécessaire de considérer non seulement les critères de coût et de disponibilité mais aussi sa solidité, sa simplicité et sa plage gamme de mesure. Bien que, dans leur plage de mesure, la plupart des indicateurs de roulance soient fonctionnellement équivalents, il se peut que certains ne répondent pas à des exigences particulières en raison de leur conception. Il est à noter aussi que de nombreux indicateurs de roulance sont conçus pour des chaussées nouvellement revêtues et risquent donc de ne pas pouvoir être utilisés pour mesurer des défauts moyens ou importants. En général, les appareils électro-mécaniques (compteurs mécaniques, moteurs pas à pas, etc.) doivent être évités parce qu'ils supportent difficilement le rythme élevé des mouvements de la suspension du véhicule sur les mauvaises routes. Par ailleurs, leurs performances peuvent être influencées par la tension électrique, qui peut varier en cours d'utilisation ce qui amplifie les erreurs de mesure. Certains indicateurs de roulance, tel que le PCA meter, ont été utilisés pour calculer un total "pondéré" de mesures. La plupart des PCA meters peuvent être utilisés pour mesurer la pente moyenne rectifiée (PMR) par simple addition des mesures; cependant, certains peuvent être câblés de façon à éviter d'enregistrer toutes les mesures. Si toutes les mesures ne sont pas enregistrées, la linéarité ainsi que la précision relative de l'appareil de type-réponse diminuent et il en résulte une réduction de la précision finale.

Les seuls modèles d'indicateur de roulance qui aient été validés pour être utilisés sur toute la gamme des défauts couverte par l'Expérience internationale sur les défauts d'uni des routes ont été développés par les organismes de recherches routières pour leur propre utilisation; ce sont : l'appareil BI (TRRL), l'appareil NAASRA (ARRB) et le Mays Meter modifié [1] (GEIPOT).

Chaque indicateur de roulance est conçu différemment; il faut donc toujours étudier le manuel d'instructions pour comprendre son principe de fonctionnement. Les instructions sont rarement suffisantes pour expliquer comment obtenir des mesures étalonnées des défauts d'uni et certaines des méthodes suggerées peuvent être périmées ou ne pas correspondre aux normes. Il faut donc utiliser principalement le manuel pour comprendre le principe de fonctionnement des instruments de mesure, mais se servir des règles générales présentées ici pour comprendre comment les utiliser.

4.1.2 Le véhicule. Avec un indicateur de roulance, on peut utiliser trois types de véhicules pour constituer un appareil de type-réponse; ce sont :

1) Un véhicule de tourisme normal ou une camionnette à essieu arrière rigide. L'utilisation d'un véhicule à roues arrières indépendantes est à exclure parce que les mouvements de roulis du véhicule seraient perçus comme des défauts d'uni. Il est conseillé d'utiliser un véhicule à traction arrière parce que l'essieu, en raison de sa masse, est plus proche de la norme. En outre, les ressorts à boudins sont préférables aux ressorts à lames parce que les frictions de Coulomb sont moindres.

2) Une remorque à deux roues. La remorque doit être équipé d'un essieu rigide. La configuration du véhicule qui la tire n'est pas très importante, à condition

---

[1] Le Mays Meter (Rainhart, Etats-Unis) vendu dans le commerce ne peut pas toujours fournir des mesures des défauts d'uni valables pour les mauvaises routes (IRI > 4 m/km).

d'utiliser toujours le même véhicule entre deux étalonnages : les caractéristiques du véhicule ont en effet une influence sur les mesures de la pente moyenne rectifiée. En cas de remplacement du véhicule de traction, il faut recommencer l'étalonnage de l'appareil de type-réponse.

3) Une remorque à une seule roue. Comme pour la remorque à deux roues, il faut refaire l'étalonnage quand on change le véhicule de traction. Le système d'attache doit pouvoir maintenir la remorque bien droite pendant son utilisation.

4.1.3 Installation de l'indicateur de roulance dans le véhicule. Dans le cas d'un véhicule utilisant les deux traces de roue de la voie parcourue, (voiture, camionette ou remorque à deux roues), le transducteur d'indicateur de roulance doit être monté verticalement (à 5 degrés maximum de la verticale) entre la carosserie (ou châssis) et le centre de l'essieu. Il faut s'assurer que le transducteur est correctement placé afin d'éviter d'enregistrer les mouvements supplémentaires causés par les manoeuvres du véhicule (freinage, accéleration et virages qui, de toutes façons, doivent être évités dans la mesure du possible pendant l'épreuve).

Dans le cas d'une remorque à une seule roue, l'indicateur de roulance fait en général partie intégrante de la remorque. S'il faut le remplacer, le nouvel indicateur de roulance doit être installé verticalement à la même place que le précédent.

4.1.4 Vitesse d'utilisation. Pour la mesure de l'indice IRI, la vitesse normalisée est de 80 km/h. La valeur de l'indice IRI est définie en fonction des caractéristiques d'un appareil de type-réponse, lorsque celui-ci fonctionne à cette vitesse; ainsi, la reproductibilité associée à un appareil de type-réponse est généralement meilleure quand cette vitesse est respectée. Les mesures de pente moyenne rectifiée (PMR) obtenues par un appareil de type-réponse dépendent de la vitesse et les utilisateurs des instruments doivent donc se rendre compte qu'il est important de faire toutes les mesures à la même vitesse. Néanmoins, il y a des cas où l'on peut avoir besoin de vitesses plus faibles :

1) La vitesse de 80 km/h est dangereuse du fait de la circulation, des piétons, de la géométrie de la route, etc.

2) L'indicateur de roulance fournit des mesures fausses et incohérentes à 80 km/h sur les mauvaises routes.

3) Le projet comporte principalement des segments courts et la répétabilité sur chacun des sites a une forte priorité. La faible dimension des sites est compensée dans une certaine mesure par l'augmentation du temps nécessaire pour les parcourir à une vitesse réduite.

4) Le véhicule ou l'indicateur de roulance de l'appareil de type-réponse sont trop fragiles pour un fonctionnement prolongé à cette vitesse. On est donc obligé de réduire la vitesse si l'on veut effecuter les mesures.

La solution recommandée pour résoudre les problèmes liés à la fragilité des mécanismes ou à l'incohérence des résultats consiste à remplacer le véhicule ou l'indicateur de roulance par des moyens plus robustes. Si les situations décrites ci-dessus sont inévitables sur un nombre de sites non négligeable, on peut alors fixer une vitesse normalisée plus faible pour toutes les mesures à effectuer à l'aide d'un appareil de type-réponse (dans ce cas, les vitesses conseillées sont de 50 ou 32 km/h). La référence d'étalonnage est toujours l'indice IRI. Il faut donc suivre la méthode d'étalonnage décrite dans la section 4.2, la seule différence étant que l'appareil de type-réponse fonctionnera à la vitesse choisie.

Si le nombre de segments courts à ausculter à une vitesse réduite n'est pas important, on peut utiliser les méthodes de correction de la vitesse décrites dans la section 4.2.

4.1.5 Choix des amortisseurs. C'est la partie du véhicule dont l'effet est le plus important sur les réponses de l'appareil de type-réponse aux défauts d'uni. Afin d'obtenir une meilleure reproductibilité (et par conséquent, une meilleure précision), le véhicule doit être équipé d'amortisseurs très "rigides". Lorsqu'on utilise des amortisseurs trop "souples" (souvent choisis par le constructeur de la voiture pour améliorer le confort), certains appareils de type-réponse risquent d'entrer en résonance avec des défauts d'uni de la route qui n'ont pas normalement d'effet sur d'autres appareils de type-réponse ni sur la référence normalisée, ce qui entraîne des données "erratiques". Les amortisseurs "rigides" ont aussi l'avantage de diminuer l'influence d'autres sources d'erreur et de ce fait, il est plus facile de maintenir l'appareil de type-réponse bien étalonné.

Les amortisseurs sont des éléments si importants dans les performances des appareils de type-réponse qu'il est nécessaire de refaire l'étalonnage à chaque fois qu'ils sont remplacés, même si les nouveaux amortisseurs sont de la même marque et du même modèle que les précédents. Comme de toute façon il faut refaire l'étalonnage, il n'y a aucun avantage à reprendre des amortisseurs identiques, sauf si leurs performances sont entièrement satisfaisantes. Les principales caractéristiques à rechercher sont : la robustesse, une faible sensibilité à la température, et un fort amortissement (les amortisseurs doivent être "durs"). On peut juger si les amortisseurs installés procurent un amortissement suffisant en comparant directement les valeurs de la pente moyenne rectifiée (en m/km) données par l'appareil de type-réponse aux valeurs de l'indice IRI sur les surfaces utilisées pour l'étalonnage. Si les mesures fournies par le véhicule dépassent de 20% en moyenne l'indice IRI sur des sites à défauts d'uni modérés il est conseillé d'augmenter le pouvoir d'amortissement de la suspension du véhicule.

4.1.6 Chargement du véhicule. Le poids de la carrosserie du véhicule a une influence sur les mesures des défauts d'uni : une augmentation du poids du véhicule se traduit d'habitude par une augmentation de la pente moyenne rectifiée mesurée. Cet effet est presque complètement éliminé lorsque l'indicateur de roulance est monté sur une remorque. Mais lorsque l'indicateur de roulance est monté sur une voiture ou sur un camion, il faut veiller à ce que le chargement du véhicule reste constant pendant toute la durée des mesures des défauts et de l'étalonnage, bien que l'on ne puisse pas éviter certaines variations dues à la consommation de carburant. Pendant les essais, le véhicule ne doit transporter ni charges ni passagers étrangers à la nécessité du service.

4.1.7 Pression des pneumatiques. Les valeurs des mesures des défauts d'uni augmentent avec la pression des pneumatiques (pour les appareils de type-réponse montés sur véhicule de tourisme, comme pour ceux montés sur remorque). Par conséquent, la pression doit être vérifiée tous les matins avant la mise en marche du véhicule et convenablement choisie en fonction des caractéristiques du véhicule.

4.1.8 Liaisons mécaniques avec l'indicateur de roulance. Le transducteur de l'indicateur de roulance est relié à l'essieu du véhicule par un moyen quelconque. Si le transducteur d'indicateur de roulance est tenu par un ressort, il peut parfois osciller indépendamment si le ressort n'est pas suffisamment rigide, ce qui se traduit alors par des mesures trop fortes. Si les liaisons entre l'essieu, le transducteur et la carrosserie (ou le châssis de la remorque) ne sont pas étroitement solidaires, des mesures seront perdues. Les poulies d'un arbre peuvent patiner de sorte que là aussi, certaines mesures peuvent être perdues. Il est donc conseillé que l'inspection et le maintien en bon état de ces liaisons figurent dans les règles d'utilisation.

4.1.9 Roues mal équilibrées ou voilées. L'ensemble rotatif pneu-roue de l'essieu sur lequel est monté l'indicateur de roulance peut osciller en raison d'un déséquilibrage ou de la rotation irrégulière

de la roue, ce qui augmente les mesures. L'augmentation des mesures due aux vibrations engendrées par l'ensemble pneu-roue prend une importance plus grande sur les routes relativement lisses, où les vibrations provoquées par la chaussée sont plus faibles. Cet effet peut être réduit en utilisant des pneus de très bonne qualité, montés sur les roues de façon à ce que les talons ou les tringles du pneu soient bien en place. Les pneus ou les roues endommagées doivent être remplacés, ainsi que les pneus comportant un "méplat" causé par un dérapage ou un freinage de détresse. L'ensemble pneu-roue de l'essieu équipé de l'indicateur de roulance doit être statiquement équilibré (l'équilibrage dynamique ne présente pas d'avantages), à moins de 8 grammes-mètre (1,0 pied-once) pour les utilisations courantes. L'étalonnage doit être refait à chaque fois que l'un des éléments de l'ensemble a été remplacé.

4.1.10 Effets de la température. Pour le véhicule d'un appareil de type-réponse, le plus important au point de vue mécanique est son aptitude à amortir les vibrations de la suspension. Si l'amortissement est trop faible, les réponses mesurées sont trop nombreuses et si l'amortissement est trop fort, le nombre des réponses mesurées est incomplet. L'amortissement découle des propriétés mécaniques des amortisseurs, des pneus et des articulations de la suspension. Malheureusement, l'amortissement varie fortement avec la température des différents éléments qui contribuent à l'amortissement total. Quand la température de l'air est au-dessus de 0 °C, les variations de l'amortissement restent peu importantes dans une plage de 10 degrés ou moins (par exemple, les variations entre 20 et 30 °C ne devraient pas avoir d'influence notable sur les mesures des défauts d'uni). Les variations plus importantes ont généralement un effet notable. Plus la température est élevée, plus le chiffre enregistré est élevé. Quand la température descend à 0 °C ou en dessous, les mesures prises par l'appareil de type-réponse deviennent beaucoup plus sensibles à la température.

Dans la plupart des situations, ce sont les défauts de la route eux-mêmes qui ont, de loin, le plus d'influence sur la température des pièces : Les amortisseurs du véhicule s'échauffent plus facilement sur les mauvaises routes que sur les bonnes (8). C'est pourquoi on ne doit pas manquer de réchauffer suffisamment les pièces avant tout travail de relèvement de données, ou avant un étalonnage. Le temps nécessaire à cet échauffement dépend du véhicule et de l'importance des défauts de la route. Les durées ordinaires d'échauffement vont de 10 à 30 minutes. Il faut les déterminer expérimentalement pour chaque appareil de type-réponse comme il est indiqué à la section 4.3.3. Pour assurer cet échauffement, il faut faire marcher l'appareil de type-réponse à la même vitesse que pour un essai normal, sur des chaussées présentant à peu près (à 20 % près) les mêmes défauts que la chaussée à vérifier. Si l'appareil de type-réponse doit rouler sur de bonnes routes pour se rendre sur une mauvaise route qu'il s'agit de vérifier, il faut alors prolonger la durée de l'échauffement en faisant circuler le système sur la mauvaise route.

4.1.11 Effets de l'eau et de l'humidité. Normalement, les propriétés mécaniques du véhicule faisant partie de l'appareil de type-réponse ne sont pas influencées directement par l'eau. Cependant, la pluie et l'eau qui se trouve à la surface de la chaussée peuvent influencer indirectement les mesures des défauts en refroidissant les pièces à une température en dessous de la normale, ce qui se traduit par une diminution du chiffre enregistré. Le problème classique est celui de l'eau qui asperge et refroidit les amortisseurs et les pneus. Si le climat est tel que les journées pluvieuses sont la norme et non l'exception, il faut procéder à un étalonnage sous la pluie afin de pouvoir convertir les mesures brutes prises les jour de pluie et les rapporter à l'échelle de l'indice IRI.

Un autre problème lié à l'eau est constitué par l'accumulation de boue, de neige et de glace dans les roues, ce qui entraîne un deséquilibrage de l'ensemble pneu-roue (section 4.1.9.). La présence de glace sur la carrosserie a une influence sur le poids du véhicule et par conséquent, sur les lectures de l'indicateur de roulance.

4.2 Etalonnage d'un appareil de type-réponse.

Etant donné que les réponses d'un appareil de type-réponse particulier sont uniques et varient en fonction du temps, le système doit être étalonné lors de sa première mise en service et ensuite périodiquement, au cours de la durée de son utilisation, dès que les réponses dépassent les limites de contrôle (voir section 4.3.4.).

4.2.1 Méthode d'étalonnage. L'étalonnage s'effectue en relevant des mesures "brutes" de la pente moyenne rectifiée (les "comptages/km" ou tout autre valeur donnée comme mesure par l'instrument) sur des sites d'étalonnage spéciaux. Ces sites sont des segments dont l'indice IRI est connu à la suite de mesures effectuées à l'aide de méthodes de la classe 1 ou 2 (mire et niveau ou profilographe). L'appareil de type-réponse est essayé périodiquement 3 à 5 fois sur les sites d'étalonnage à la vitesse normalisée, après un bon échauffement (on peut se servir de sites d'étalonnage longs afin de réduire le nombre des passages nécessaires, comme il est indiqué dans la section 2.3.1.). Les valeurs "brutes" de la PMR fournies par l'appareil de type-réponse sont portées en abscisse sur un graphique et celles de l'indice IRI sont portées en ordonnées, comme dans les quatre exemples de la figure 6. On trace alors entre les points une ligne de régression qui est utilisée pour estimer l'indice IRI à partir des mesures effectuées sur le terrain par l'appareil de type-réponse. La précision des mesures étalonnées peut s'apprécier approximativement à l'épaisseur du nuage des points répartis de part et d'autre de la ligne : cette précision est meilleure quand les points sont moins écartés.

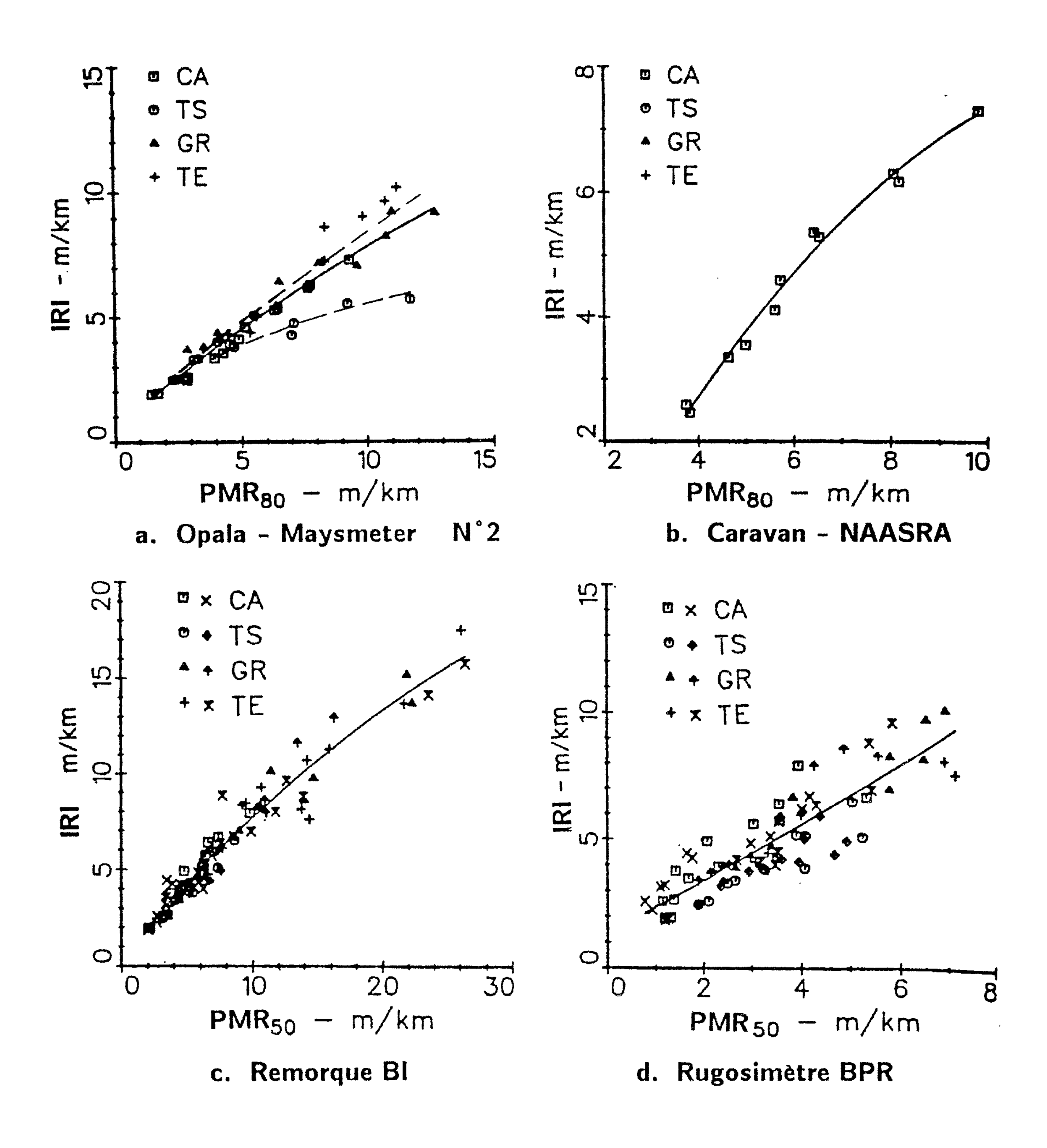
a) Etalonnage de tout un parc de véhicules. Chaque appareil de type-réponse nécessite un étalonnage particulier. Même quand les véhicules et les indicateurs de roulance de deux appareils de type-réponse sont neufs et du même modèle, il peut y avoir un écart de 25% entre les réponses des deux systèmes. Des écarts beaucoup plus importants peuvent se présenter avec des appareils usés. Par conséquent, il ne faut pas chercher à étalonner un parc entier de véhicules.

b) Etalonnage à différentes vitesses. Lorsqu'il est nécessaire, pour une raison quelconque, de conduire les essais à une vitesse autre que la vitesse normalisée, l'équation d'étalonnage habituelle ne s'applique pas. On doit établir des équations différentes entre les mesures "brutes" et les indices IRI pour chacune des vitesses, comme il est indiqué dans la section 4.2.5.

c) Etalonnage pour différents types de surface. Selon la précision des données requise après l'étalonnage et selon les pratiques locales de construction des routes, l'établissement d'équations d'étalonnage séparées pour les différents types de surface (revêtues et non revêtues) est justifié. Dans la présente section, on trouvera les règles générales relatives à un seul étalonnage. Ces règles concernent tous les types de chaussées couvertes par le projet. L'expérience montre qu'elles sont suffisantes pour les chaussées en béton bitumineux, en béton Portland (PCC), les chaussées traitées en surface "chip seal" et les routes brésiliennes en terre battue et en graves.

Un examen des données d'étalonnage peut permettre de déterminer s'il existe une erreur systématique inacceptable qui peut être attribuée au type de surface. Si c'est le cas, on peut effectuer des étalonnages séparés pour chaque sous-ensemble de types de surface. Par exemple, le graphique de la figure 6a comporte des données appartenant à quatre types de surface. Les points correspondant au béton bitumineux, à la grave et à la terre battue semblent répartis de manière relativement régulière. Cependant, il y a quatre points "excentrés", correspondant à des mesures prises sur des sites légèrement affectés par la tôle ondulée. Les valeurs mesurées ont été amplifiées par la résonnance du véhicule sur la tôle ondulée. Au pire, il existe un écart de 4 m/km entre l'indice IRI estimé à partir de la ligne d'étalonnage et l'indice réel.

Figure 6. Exemples de courbes d'étalonnage



La précision pourrait être meilleure à condition d'effectuer un étalonnage séparé des sites traités en surface. Dans ce dernier cas, on obtient deux équations d'étalonnage, comme l'indiquent les lignes en pointillés. En utilis ant deux étalonnages séparés, l'erreur maximum est réduite de moitié. Un second exemple est donné par la courbe de la figure 6c. Ici, il n'y a évidemment pas d'erreur systématique due au type de surface. La plus grande erreur possible est d'environ 3 m/km, mais les errreurs les plus courantes sont beaucoup plus petites : environ 1 m/km. Donc, l'équation correspondant à un seul étalonnage est également représentative des quatre types de revêtement.

4.2.2 Equation d'étalonnage. Les données collectées sur les sites d'étalonnage sont utilisées pour effectuer une analyse de régression entre les valeurs de l'indice IRI et les mesures "brutes" fournies par l'appareil de type-réponse, en minimisant l'erreur quadratique entre ces deux valeurs à l'aide d'une équation du second degré. Lorsqu'on utilise un appareil de type-réponse à trace unique, la régression est calculée sur la base des différentes mesures individuelles correspondantes. Lorsqu'on utilise un appareil de type-réponse faisant les relevés sur deux traces de roue, l'indice IRI est calculé pour les deux traces parcourues par les pneus de l'appareil et on fait la moyenne de ces deux nombres. Cette moyenne est alors utilisée comme mesure de l'indice IRI pour cette voie, et on fait l'analyse de régression avec cette mesure unique.

Les estimations ultérieures de l'indice IRI faites à partir de l'appareil de type-réponse en utilisant l'équation d'étalonnage sont en fait les mesures étalonnées des défauts d'uni faites par l'appareil et sont appelées E (indice IRI) dans cette section. Les détails mathématiques nécessaires au calcul de l'équation sont regroupés à la figure 7. La précision associée à l'appareil de type-réponse peut aussi être calculée en se servant de l'équation (2) de la figure 7. Elle est quantifiée par l'écart type (ET) de l'estimation de l'indice IRI.

Il faut remarquer ici que l'équation d'étalonnage et l'écart type sont calculés en utilisant une convention opposée à celle normalement utilisée dans les analyses statistiques (c'est-à-dire que les définitions de x et de y utilisées dans les analyses classiques des écarts sont inversées), étant donné que l'étalonnage a un autre objet. Plutôt que de décrire les caractéristiques statistiques des mesures brutes de la pente moyenne rectifiée, l'utilisateur se préoccupe plutôt de la précision de la mesure finale des défauts d'uni. Par conséquent, quand on utilise les formules classiques d'analyse statistique, il faut vérifier que les variables x et y sont correctement associées aux mesures de l'appareil de type-réponse et de l'indice IRI.

4.2.3 Choix des sites d'étalonnage. Pour qu'un étalonnage soit valable, les sites doivent être représentatifs des routes à étudier dans le projet. Les sites devront de préférence être situés sur des sections droites ou à courbure réduite, et les caractéristiques des défauts d'uni devront être uniformes sur toute la longueur des sites, y compris sur une voie d'approche de 50 m. Lorsqu'ils sont utilisés pour des projets à long terme, les sites d'étalonnage doivent être localisés sur des routes peu utilisées et dont les propriétés ne varient que lentement avec le temps.

a. Gamme des défauts d'uni. Il est essentiel que les sections choisies soient "naturellement" pourvues de défauts résultant d'une vie normale de la route comportant la construction, l'entretien et l'utilisation (les défauts artificiels des sites d'étalonnage ne pourraient servir à étalonner un appareil de type-réponse pour des routes réelles). L'étalonnage est techniquement valable uniquement dans la gamme des défauts présents sur les sites d'étalonnage; il faut donc, dans toute la mesure du possible, éviter les extrapolations. En tout cas, il ne faut pas faire d'extrapolation dépassant 30 % dans chaque sens (30 % en-dessous du site d'étalonnage le plus lisse et 30 % au-dessus du plus mauvais). Si on doit aller au-delà de la gamme prévue, il faut trouver des sites d'étalonnage appropriés.

Figure 7. Calcul de l'équation d'étalonnage.

L'équation d'étalonnage d'un appareil de type-réponse est :

$$E(IRI) = A + B \, . \, PMR + C \, . \, PMR^2$$

PMR est la mesure "brute" de la pente moyenne rectifiée avec pour unités : les comptages/km ou des unités équivalentes (in/mile, mm/km, etc.) et E(IRI) est l'évaluation de l'IRI à l'aide des mêmes unités que la PMRR (m/km conseillés). Les coefficients A,B et C se calculent comme indiqué ci-dessous, avec N = nombre de sites d'étalonnage, x_i = mesure de la PMR sur le $i^{ème}$ site, et y_i = défaut d'uni $PMRR_{80}$ du $i^{ème}$ site (calculé à partir d'un profil mesuré). La précision des mesures E(IRI) est l'écart-type (ET) qui doit également être calculé comme il est indiqué ci-dessous.

$$\overline{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i = (x_1+x_2+\ldots x_N)/N \qquad \overline{x^4} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^4 = (x_1^4+x_2^4+\ldots x_N^4)/N$$

$$\overline{x^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^2 = (x_1^2+x_2^2+\ldots x_N^2)/N \qquad \overline{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} y_i = (y_1+y_2+\ldots y_N)/N$$

$$\overline{x^3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^3 = (x_1^3+x_2^3+\ldots x_N^3)/N \qquad \overline{y^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} y_i^2 = (y_1^2+y_2^2+\ldots y_N^2)/N$$

$$\overline{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i \cdot y_i = (x_1 \cdot y_1+x_2 \cdot y_2+\ldots x_N \cdot y_N)/N$$

$$\overline{x^2y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^2 \cdot y_i = (x_1^2 \cdot y_1+x_2^2 \cdot y_2+\ldots x_N^2 \cdot y_N)/N$$

$$C = \frac{(\overline{x^2y} - \overline{x^2} \cdot \overline{y}) \cdot (\overline{x^2} - \overline{x} \cdot \overline{x}) + (\overline{x} \cdot \overline{x^2} - \overline{x^3}) \cdot (\overline{xy} - \overline{x} \cdot \overline{y})}{(\overline{x^4} - \overline{x^2} \cdot \overline{x^2}) \cdot (\overline{x^2} - \overline{x} \cdot \overline{x}) - (\overline{x^3} - \overline{x} \cdot \overline{x^2})^2}$$

$$B = \frac{[\overline{xy} - \overline{x} \cdot \overline{y} + C \cdot (\overline{x} \cdot \overline{x^2} - \overline{x^3})]}{\overline{x^2} - \overline{x} \cdot \overline{x}}$$

$$A = \overline{y} - B \cdot \overline{x} - C \cdot \overline{x^2}$$

$$\begin{aligned} ET = \; & \overline{y^2} + A^2 + (B^2 + 2 \cdot A \cdot C) \cdot \overline{x^2} + C^2 \cdot \overline{x^4} \\ & - 2 \cdot A \cdot \overline{y} - 2 \cdot B \cdot \overline{xy} - 2 \cdot C \cdot \overline{x^2y} \\ & + 2 \cdot A \cdot B \cdot \overline{x} + 2 \cdot C \cdot \overline{x^3} \end{aligned}$$

b. Uniformité. Les défauts des sites d'étalonnage doivent être uniformes, de façon à ce que le taux d'accumulation des mesures fournies par l'indicateur de roulance de l'appareil de type-réponse reste constant pendant tout le parcours du segment. Un appareil de type-réponse se comporte différemment sur une route dont les défauts sont uniformes et modérés et sur une route très bonne sur une moitié et très mauvaise sur l'autre. S'il s'agit d'étalonner un appareil de type-réponse à deux roues, les défauts doivent être raisonablement uniformes des deux côtés.

c. Approche. Il faut se rappeler que les véhicules réagissent à la route après être passés sur celle-ci, et que la mesure sur un site résulte partiellement du passage sur la surface précédant immédiatement le site. Par conséquent, il faut éviter les sites où les 50 m d'approche présentent des défauts nettement différents.

d. Géometrie. Les étalonnages doivent se faire de préférence sur des segments de route en ligne droite. Ce n'est qu'exceptionnellement qu'on peut accepter une légère courbure. Il n'est pas nécessaire que la route soit horizontale mais il ne doit pas y avoir de changement de pente sensible, ni avant ni sur le site, car tout changement de pente peut avoir une influence sur les mesures faites avec un appareil de type-réponse. Une faible pente peut faciliter le maintien d'une vitesse d'essai constante et réduire les efforts nécessaires pour mesurer manuellement le profil avec une mire et un niveau.

e. Répartition défauts d'uni sur les sites. Afin de minimiser l'erreur d'étalonnage (section 2.3.2), chaque niveau de la gamme des défauts présentant un intérêt doit être représenté à peu près également au cours de l'étalonnage. Le tableau 1 qui présentait les conditions de précision requises dans la section 3, donne sept niveaux de défauts d'uni. Chacun de ces niveaux, s'ils doivent être rencontrés dans le projet, doit être représenté également par les sites d'étalonnage. Le tableau 4 présente les conditions requises de répartition des défauts : Il doit y avoir au minimum deux sites d'étalonnage pour chaque niveau rencontré dans le projet. Quand il y a plus de deux sites pour chaque niveau, les sites supplémentaires doivent être choisis de façon à maintenir une répartition homogène. En aucun cas le nombre de sites du niveau "le mieux représenté" et celui du niveau "le moins bien représenté" ne doivent différer de plus d'une unité.

La figure 1 (section 2) et les figures 12 et 13 (ainsi que le texte correspondant dans la section 5) peuvent être utiles pour déterminer approximativement les niveaux des défauts avant l'étalonnage. Il est à noter que les sept niveaux du tableau 1 couvrent une gamme très large de qualités des routes. Le niveau le plus lisse ne se rencontre que sur les autoroutes de très haute qualité et sur les pistes d'atterrissage et les deux niveaux les plus élevés ne s'appliquent qu'aux mauvaises routes non revêtues.

f. Nombre et longueur des sites. Afin que l'équation d'étalonnage soit représentative, elle doit être basée sur des données suffisantes. Le tableau 4 donne les conditions minimums concernant le nombre et la longueur des sites.

Remarquons qu'il est impossible de concevoir un étalonnage valable qui ne remplisse qu'au "minimum" chacune des conditions du tableau. Par exemple, si le projet couvre six ou sept niveaux de défaut d'uni il faudra avoir un minimum de 12 sites (deux pour chacun des niveaux). Mais si on n'utilise que 12 sites, ceux-ci doivent avoir une longueur d'au moins 375 m (4500 m/12 sites = 375 m/site). On peut aussi utiliser 23 sections de 200 m de longueur.

On peut obtenir une meilleure précision en augmentant la longueur totale des sites au-delà de celle donnée dans le tableau, soit en utilisant des sites plus longs, soit en utilisant un plus grand nombre de sites d'une longueur donnée. Cependant, la précision d'ensemble est actuellement limitée par les qualités de reproductibilité des appareils de type-réponse et les conditions données dans le tableau sont suffisantes pour n'avoir qu'une erreur d'étalonnage négligeable dans la plupart des cas. Les sites longs

Tableau 4. Résumé des conditions requises pour les sites d'étalonnage

	Types d'appareil de type-réponse	
	A deux traces	A une trace
Nombre minimum de sites	8	12
Nombre conseillé de sites pour chaque niveau des défauts d'uni couverts par l'étalonnage (voir les définitions des sept niveaux dans le tableau 1)	2	3
Différence maximum entre le nombre de sites représentant chaque niveau (c'est-à-dire que la répartition des sites entre les différents doit être uniforme).	1	1
Longueur minimum du site[1]	200 m	200 m
Différence permise entre les longueurs des sites[1] (tous les sites doivent avoir la même longueur)	0	0
Longueur totale recommandée (longueur de site x nombre de sites)	4,5 km	6,0 km
Nombre conseillé de répétitions des mesures de l'appareil de type-réponse sur chaque site (L = longueur en mètres).	1000/L	1000/L
Distance minimum d'approche du site (l'appareil de type-réponse doit être amené à la vitesse prévue avant d'entrer dans la zone d'approche)	50 m	50 m

[1]En pratique, il peut être parfois difficile de trouver des sites à la fois longs et homogènes sur les mauvaises routes non revêtues. Pour l'étalonnage, mieux vaut couvrir des sites plus courts mais homogènes plutôt que d'omettre des sites présentant un niveau de défauts élevé.

ont le principal avantage de ne pas nécessiter autant de répétitions des mesures d'étalonnage, ainsi qu'il est expliqué dans la section 2.3.1. Cette solution est recommandée quand on dispose d'un profilomètre à grande vitesse pour établir les valeurs de référence de l'indice IRI.

Pour l'étalonnage, tous les sites doivent avoir la même longueur mais cette restriction ne s'applique pas aux mesures habituelles des défauts d'uni des routes. Lorsque l'indice IRI du site est mesuré à la mire et au niveau, il est normal de choisir des sites courts, de façon à réduire le travail manuel. Cependant, l'étalonnage reste valable pour n'importe quelle longueur de route raisonnablement homogène.

g. **Détermination des traces de roue.** Pour l'étalonnage d'un appareil de type-réponse, il faut déterminer la trace (ou les traces) de roue afin de s'assurer que les lignes de la route parcourues par le pneu (ou les pneus) de l'appareil de type-réponse sont les mêmes que celles qui ont été mesurées à l'aide de la mire et du niveau. Dans le cas d'un système à une seule trace, seule la trace parcourue à besoin être marquée. Dans le cas d'un système à deux traces, les deux traces de roue parcourues par le véhicule doivent être marquées et l'espace qui les sépare doit être le même que l'écartement entre les pneus de l'essieu de l'indicateur de roulance. Une trace choisie pour l'étalonnage d'un appareil de type-réponse ne doit pas présenter de défaut particulier dans les 40 m précédents car ces défauts ont une influence sur les mesures mais ne sont pas pris en compte dans l'indice IRI. Le point de départ, le point d'arrivée et la position latérale des traces doivent être marqués clairement pour s'assurer que l'équipe de relèvement mesure le bon profil et pour que le conducteur du véhicule puisse maintenir un alignement correct de l'appareil de type-réponse.

4.2.4 Détermination de l'indice IRI des sites d'étalonnage. On détermine l'indice IRI des sites d'étalonnage en obtenant une mesure de profil de classe 1 ou 2 sur les sites prévus et en calculant les valeurs de l'indice IRI, comme il est indiqué dans la section 3.

a) **Fréquence des mesures.** Il peut être nécessaire de recommencer périodiquement les mesures de l'indice IRI sur les sites d'étalonnage revêtus, en particulier si le projet doit durer longtemps. La fréquence à laquelle les mesures doivent être répétées avec une méthodes de classe 1 ou 2 dépend des conditions locales et de la précision requise par le projet. Pour les routes revêtues qui ne sont pas soumises à une circulation intense ni à des changements saisonniers brusques, l'indice IRI peut changer si lentement que la répétition des mesures n'est nécessaire qu'une fois par an environ. Pour les routes non revêtues, l'uni est si sensible aux conditions climatiques et météorologiques que l'indice IRI change en un temps beaucoup plus court. En cas de pluie, de changements importants de l'hygrométrie ou de la température, ou de circulation intense, l'uni peut changer en l'espace de quelques semaines, de quelques jours ou même de quelques heures. Par conséquent, les étalonnages effectués sur des sites non revêtus doivent être planifiés de telle façon que l'appareil de type-réponse soit étalonné à peu près au même moment où ces sites non revêtus ont été mesurés à l'aide d'une méthode profilométrique. Naturellement, dès que les sites d'étalonnage ont été soumis à un entretien quelconque, les valeurs des indices IRI changent et les mesures précédentes ne sont plus valables pour les étalonnages ultérieurs.

b) **Remplacement des sites d'étalonnage.** Lorsque la valeur de l'indice IRI d'un site donné a changé, ce site ne peut plus servir à d'autres étalonnages avant qu'un nouvel indice IRI soit établi. Techniquement, il est indifférent de remesurer l'ancien site ou de choisir un nouveau site. Etant donné que la pratique normale est de réparer les routes "les plus mauvaises", on peut s'attendre à ce que la réparation d'une route comportant certains sites d'étalonnage "mauvais" se fasse pendant la durée couverte par un long projet. A condition de disposer d'autres sites similaires, les étalonnages courants d'un appareil de type-réponse peuvent continuer. Chaque fois qu'il est nécessaire de mesurer l'indice IRI d'un site d'étalonnage, on doit choisir le "meilleur" site possible, c'est-à-dire, celui qui convient le

mieux du point de vue de la longueur, de la géométrie, de l'uni, de l'emplacement, et de la permanence sur une longue période. A moins que le projet ne comporte l'étude des changements de l'uni d'un certain site d'étalonnage, il n'y aura pas d'avantage particulier à reprendre les mêmes sites.

4.2.5 **Compensation des vitesses non standard.** Lors de l'étude de l'état d'une route, il peut y avoir des situations où il est impossible d'obtenir des mesures de l'uni à la vitesse normalisée de 80 km/h. Il peut être nécessaire de circuler à une vitesse moindre en raison de l'intensité du trafic local, d'une géométrie contraignante ou de défauts d'uni importants supérieurs à la gamme des défauts mesurés par un appareil de type-réponse donné. Dans ces cas-là, il est recommander de prendre les mesures à la vitesse de 50 km/h. A la limite, on peut prendre 32 km/h, mais il faut éviter de travailler à des vitesses plus faibles, car les mesures seraient fortement influencées par la façon dont les pneus de l'appareil épousent le sol.

Afin de pouvoir calculer l'indice IRI, l'opérateur doit imaginer un moyen de convertir les mesures faites à une vitesse inférieure. La vitesse du véhicule a des effets complexes sur les défauts observés d'une route et ces effets ont une influence subtile sur les procédures à appliquer pour étalonner et utiliser l'appareil de type-réponse. Il faut remarquer que pour les vitesses de l'ordre de 50 à 80 km/h, la pente moyenne rectifiée mesurée est parfois indépendante de la vitesse, ce qui est bon en ce sens que cela réduit les erreurs introduites dans les mesures normalisées à la suite des petites variations de vitesse en cours d'essai. Cependant, lorsque les mesures sont faites intentionnellement à des vitesses d'essai différentes de 80 km/h, il faut un étalonnage différent. Il y a deux méthodes principales pour convertir l'étalonnage.

a) **Etalonnage direct à des vitesses non standard (32 ou 50 km/h).** C'est la méthode préférée. La seule différence par rapport à la méthode d'étalonnage exposée plus haut est que l'appareil de type-réponse est utilisé à une vitesse non standard et que les mesures sont rapportées directement à l'indice IRI, sans conversion. C'est donc un étalonnage particulier s'appliquant à une vitesse déterminée.

A une vitesse très réduite, telle que 32 km/h, la reproductibilité associée à l'appareil de type-réponse peut être légèrement affectée et l'étalonnage obtenu risque de n'être applicable qu'à un certain type de surface. C'est-à-dire qu'un étalonnage unique peut donner une précision suffissante sur plusieurs types de surface quand il est effectué à une vitesse de 80 km/h, mais que des erreurs d'étalonnage systématiques risquent d'être introduites pour certains types de surface quand les mesures sont effectuées à une vitesse réduite. Ceci est dû au fait que les gammes d'ondes captées par l'appareil de type-réponse à chacune des deux vitesses sont différentes.

b) **Corrélation des mesures de la pente moyenne rectifiée effectuées à des vitesses différentes.** Il s'agit d'une autre méthode qui fait intervenir une conversion en deux temps. Elle est plus sensible aux erreurs et par conséquent, il ne faut l'utiliser que lorsqu'il est impossible de se servir de la méthode précédente.

On établit d'abord la relation de corrélation entre les mesures effectuées par l'appareil de type-réponse à la vitesse non standard et à 80 km/h en faisant des essais à chacune des deux vitesses sur un certain nombre de sites. On peut utiliser les sites d'étalonnage normaux mais il faut y ajouter un certains nombre de sites représentatifs. Il n'en résulte pas d'alourdissement notable des travaux à effectuer, car les mesures de profil ne sont pas nécessaires.

Ensuite, on utilise les mesures effectuées à la vitesse non standard pour estimer la valeur que l'on aurait dû obtenir à 80 km/h. Cette estimation est ensuite introduite dans l'équation d'étalonnage de l'appareil de type-réponse utilisé, en vue de calculer l'indice IRI.

Il est à remarquer que les niveaux des défauts d'uni couverts par cette deuxième méthode n'ont pas besoin de représenter la gamme complète des niveaux rencontrés dans les projets complets, mais seulement ceux pour lesquels les conversions dues à la réduction de la vitesse sont nécessaires. Cependant, les conditions minimums du tableau 4 s'appliquent toujours, ce qui signifie qu'il faut inclure au moins trois niveaux de défauts d'uni.

Cette deuxième méthode est moins précise que la première et peut provoquer des erreurs d'étalonnage liées à l'usage combiné de deux équations de régression.

4.3 Mode opératoire et procédures de contrôle

Pour obtenir des résultats exploitables, il faut suivre une procédure bien établie à chaque fois que l'on effectue une série de mesures. Le mode opératoire doit permettre de s'assurer que l'étalonnage est toujours valable et de vérifier le fonctionnement de l'appareil à l'aide de tests de contrôle. Le diagramme de la figure 8 montre la logique à suivre dans le mode opératoire (9). Comme la figure l'indique, le mode opératoire ne consiste pas simplement à tourner le contact mais il couvre aussi le fonctionnement et l'étalonnage de l'appareil et une surveillance constante pour vérifier que tout va bien et qu'il n'y a pas de changement. Le mode opératoire à suivre pour un projet donné doit être formulé en fonction des exigences de précision et d'efficacité du projet. La présente section décrit quelques uns des facteurs à considérer dans l'établissement du mode opératoire normal.

4.3.1 Utilisation du véhicule et de l'indicateur de roulance. Afin d'obtenir des mesures reproductibles, il faut suivre un mode opératoire standard.

a) Personnel. Il est recommandé d'avoir deux opérateurs à sa disposition. Le conducteur est responsable du maintien de la vitesse pendant l'essai et de l'alignement correct du véhicule dans les traces de roue. Le deuxième opérateur est chargé de mettre l'indicateur de roulance en marche au début du segment d'essai, de relever les mesures aux intervalles déterminés à l'avance et de noter l'emplacement des "évènements" se produisant pendant l'essai. La différence entre le poids des deux opérateurs au moment de l'utilisation et celui des deux opérateurs ayant procédé à l'étalonnage ne doit pas dépasser 10 kg.

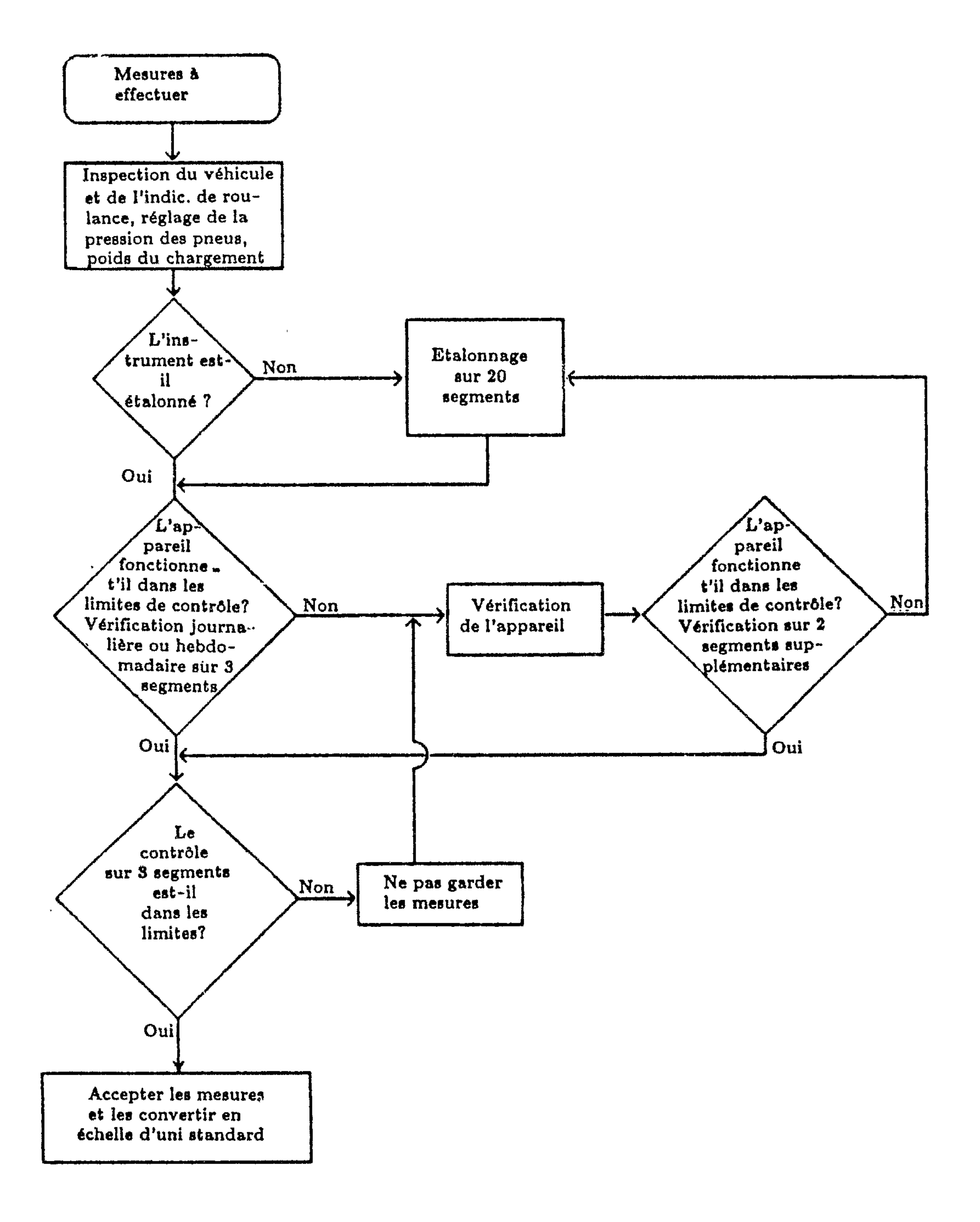
Les systèmes de mesure automatisés peuvent être mis en oeuvre par le conducteur seul. Cependant, il peut être difficile de prendre des mesures et des notes pendant la conduite du véhicule. Le mieux est probablement de n'utiliser un seul opérateur que lorsque le nombre de mesures à effectuer dans un projet est faible et que le temps perdu du fait des arrêts du véhicule pour organiser les notes prises sur le terrain est de peu d'importance.

b) Inspection. Avant d'effectuer des mesures, il faut inspecter visuellement l'appareil pour s'assurer qu'il fonctionne correctement. Les articulations mécaniques de l'indicateur de roulance, la pression des pneus et la propreté des roues doivent être vérifiées lors des pauses ou au moins une fois par jour. Pendant l'hiver, il faut éviter que de la glace ou de la neige s'accumulent sur le véhicule. La boue accumulée dans les roues peut causer des problèmes.

c) Météorologie. Il ne faut pas effectuer les mesures par forte pluie ni quand le vent souffle en rafales. Sur les routes non revêtues, il ne faut pas prendre de mesure quand la chaussée est très mouillée ou glissante, à cause de la boue qui s'accumule dans les roues et de l'eau qui refroidit les amortisseurs.

d) Réglage de la vitesse. La vitesse du véhicule ayant une influence sur les mesures, il est important qu'elle reste constante à 5 % près. Le véhicule doit être amené à la vitesse prévue au moins quelques

Figure 8. Diagramme d'utilisation d'un appareil de type-réponse.



secondes (environ 100 m) avant d'atteindre le début du segment d'essai. En général, on choisit la vitesse standard de 80 km/h.

e) **Positionnement latéral.** Le véhicule doit rester en permanence dans les traces de roue. Autant que possible, il faut éviter les nids de poule qui risquent d'endommager l'indicateur de roulance et de fausser la validité de l'étalonnage. Quand le parcours comporte des nids de poule, il faut noter leur présence et les décrire brièvement.

f) **Echauffement préalable.** Les arrêts entre les mesures doivent être réduits au minimum. Avant l'essai, il faut faire marcher le véhicule à la vitesse de l'essai pendant 5 à 10 minutes pour l'échauffer. Des durées d'échauffement plus longues, de l'ordre de 15 à 20 minutes, sont nécessaires quand les défauts d'uni dépassent 8 m/km ou par temps froid ou humide (pour plus de détails sur le choix d'un temps d'échauffement suffisant, se reporter à la section 4.3.3).

4.3.2 **Traitement des données.** La valeur indiquée par l'indicateur de roulance doit être convertie en une forme de pente moyenne rectifiée adaptée à l'indicateur de roulance, comme les comptages/km, pouces/mille ou mm/km. On calcule la pente moyenne rectifiée en divisant le total des mesures accumulées par l'indicateur de roulance sur le segment d'essai par la longueur de ce segment. Si la vitesse de l'essai diffère de la vitesse standard, il faut également le noter (lorsque les données sont acquises à des vitesses différentes, une méthode commode pour indiquer la vitesse consiste à la mentionner en indice de la pente moyenne rectifiée, par exemple PMR_{80} = 3,2; PMR_{50} = 3,8; etc.)

Le résultat étalonné s'obtient en introduisant la PMR dans l'équation d'étalonnage (figure 7) :

$$E(IRI) = A + B * PMR + C * PMR^2 \qquad (16)$$

La valeur E(IRI) est l'estimation de l'indice IRI du segment mesuré à l'aide de l'appareil de type-réponse.

Lorsque les mesures ont été répétées, il est conseillé d'en faire la moyenne avant de convertir la PMR en indice IRI.

La figure 9 représente une combinaison de formulaire de report de données à utiliser sur le terrain et de feuille de calcul pour la conversion des lectures de l'indicateur de roulance en mesures étalonnées de l'uni. La technique employée dans cet exemple exige de répéter trois fois les mesures sur chaque site. L'équation d'étalonnage donnée au-dessus du diagramme sert également à la conversion graphique en indice IRI.

4.3.3 **Essai de sensibilité à la température.** La capacité de réponse d'un appareil de type-réponse aux défauts d'uni change avec l'"échauffement" progressif des pièces quand le véhicule circule sur de mauvaises routes. Il faut effectuer un essai de sensibilité à la température au moment de la mise en service de chaque appareil de type-réponse, en vue de déterminer le temps d'échauffement nécessaire en service quotidien et d'identifier rapidement les véhicules trop sensibles à la température et qui, de ce fait, doivent être éliminés.

Il faut trouver un segment de route dont le niveau des défauts d'uni corresponde au niveau le plus élevé à prévoir. Il faut que ce segment ait la longueur minimum requise dans le tableau 4 pour un site d'étalonnage (en fait, le site d'étalonnage le plus mauvais est celui qui convient le mieux pour cet essai). Le véhicule doit être équipé d'un indicateur de roulance et être amené au site choisi, où on le laisse refroidir pendant une à deux heures. Le véhicule peut être considéré comme "froid" 15 minutes après que les amortisseurs et les pneus ont cessé d'être chauds au toucher.

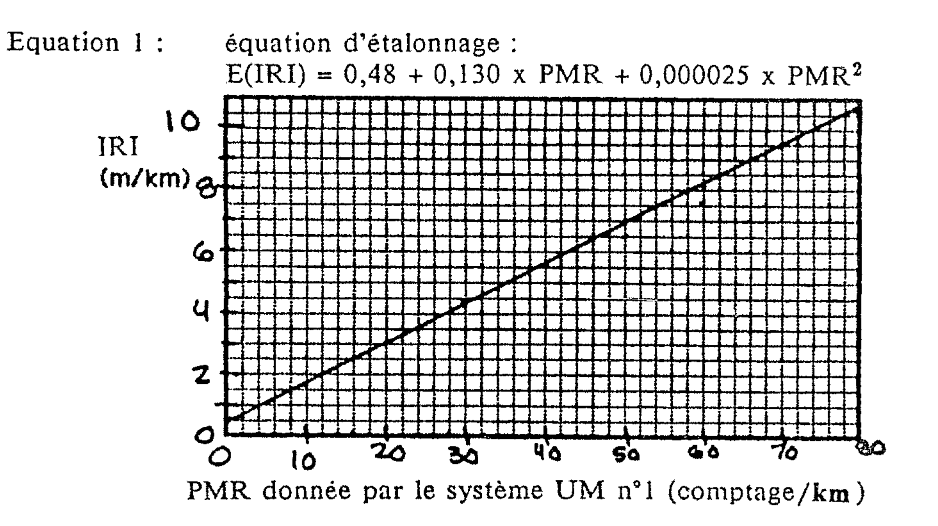
Figure 9. Exemples de formulaires à utiliser sur le terrain pour enregistrer les mesures de pente moyenne rectifiée (PMR) et les convertir en IRI.

Appareil de type-réponse UM# Conducteur TDG Opérateur Sayers

Date 3-15-85 Météo Sunny, 60°F ± 5°

Observations :

Site	Description	Vitesse (Km/h)	Longueur (Km) L	Indicateur de roulance - 3 passages (comptages) #1	#2	#3	Σ	PMR (comptages/Km) Σ/3L	IRI (m/km) eq. 1
180a	I94, mi 180	80	.50	6	6	7	19	12.6	2.1
180b	↓	↓	.50	9	8	9	26	17.3	2.7
180c	↓	↓	.5	12	12	15	39	26.0	3.8
180d	↓	↓	.5	10	9	10	29	19.3	3.0
200	Terr+Curtis	↓	1.0	32	33	~~OK~~		✗	✗
"	"	↓	"	"	"	30	95	31.7	4.6
		↓							
		↓							
		↓							
		↓							
		↓							



Lorsque le véhicule est froid, on "mesure" l'uni du site à la vitesse constante prévue pour l'essai. Il faut ensuite enregistrer l'heure et la "mesure" fournie par l'indicateur de roulance. La conversion en indice IRI n'est pas nécessaire car l'intérêt de l'opération consiste à mesurer un changement relatif. On recommence l'essai immédiatement, en enregistrant à nouveau l'heure et les indications de l'indicateur de roulance. Puis on continue jusqu'à ce que les indications de l'indicateur de roulance atteignent un niveau constant sur au moins cinq passages consécutifs.

Le temps nécessaire pour atteindre la stabilité des observations doit toujours être utilisé comme durée d'échauffement minimum. Si la différence entre la première et la dernière mesure dépasse 30 %, il faut envisager de remplacer les amortisseurs.

4.3.4 Essai de contrôle de la stabilité dans le temps de l'appareil de type-réponse. Les sites de contrôle sont des segments de route qui sont mesurés sur une base quotidienne ou hebdomadaire en vue de déterminer si l'appareil de type-réponse a changé depuis la dernière vérification. On peut aussi les utiliser pour déterminer ou pour surveiller la répétabilité de l'appareil de type-réponse et sa sensibilité aux conditions environnementales. On trouvera un exemple de méthode d'intégration des tests de contrôle dans le mode opératoire établi pour un projet et montré à la figure 8. Si les mesures prises sur les segments de contrôle ne tombent pas dans les limites établies pour le projet, il faut vérifier que l'appareil de type-réponse est en bon état et le réparer, le cas échéant. Un nouvel étalonnage est alors nécessaire, à moins que la cause de l'anomalie soit sans importance et qu'elle ait été corrigée. S'il est établi que le véhicule (ou l'indicateur de roulance) a changé, toutes les données rassemblées à l'aide de cet appareil depuis la dernière vérification doivent être abandonnées.

a) **Objectifs des tests de contrôle.** Les tests de contrôle ont eu trois objectifs principaux :

1) déceler les changements progressifs intervenus dans l'appareil de type-réponse et susceptibles d'introduire des erreurs systématiques dans les données.

2) déceler les changements de répétabilité entraînant une augmentation des erreurs dans les différentes mesures.

3) déterminer l'effet des conditions environnantes (pluie, température, vent, etc.) sur les mesures.

Les tests de contrôle sont beaucoup plus simples que les opérations d'étalonnage décrites à la section 4.2, de sorte qu'ils peuvent être conduits plus fréquemment. On les utilise uniquement pour déterminer si l'appareil de type-réponse a subi des changements et il ne faut pas s'en servir pour des compensations ou un étalonnage. Ainsi, la valeur de référence de l'indice IRI sur le site d'un test de contrôle peut être donnée par l'appareil de type-réponse immédiatement après l'étalonnage, de sorte que la mesure du profil n'est pas nécessaire.

b) **Nombre de sites.** Il faut utiliser au moins deux sites de contrôle pour chaque vérification, dont un site "lisse" et un site "mauvais". En effet, certaines erreurs n'affectent que les mesures faites sur les mauvaises routes et d'autres, celles faites sur les routes lisses seulement. L'appareil de type-réponse peut alors être vérifié périodiquement en comparant les mesures aux valeurs de référence et aux variations obtenues au cours des vérifications antérieures.

c) **Emplacement des sites.** En choisissant des sites entre le lieu de garage et les routes à contrôler, on peut vérifier le système quotidiennement, sans grande dépense de temps ni de travail. Lorsqu'un appareil de type-réponse doit être mis en oeuvre sur une région géographique étendue, il faut identifier des segments convenablement placés pour que chaque appareil de type-réponse puisse être vérifié quotidiennement en se rendant dans sa zone.

Comme il s'agit de sites de contrôle, on suppose que leur uni est stable dans le temps et il faut veiller à ce que cette hypothèse reste raisonnable. Les sites de contrôle doivent être constitués par des parties de routes revêtues où la circulation est peu intense et où aucun travaux d'entretien n'est prévu pendant la durée du projet.

d) Longueur des sites. La longueur des sites de contrôle doit être en rapport avec celle des segments de route à mesurer normalement dans le projet. Si l'on veut simplement déceler les changements progressifs de sensibilité d'un appareil de type-réponse, des sites longs de 1,5 à 5 km, sont préférables. On peut utiliser des segments plus courts, mais il sera alors plus difficile de déceler les changements de comportement de l'appareil de type-réponse, parce que la répétabilité sera moindre sur des segments courts. Sur des segments de 1,6 km de long, les différences normales sont inférieures à ± 2 %, ce qui permet de déceler de petites variations du comportement de l'appareil de type-réponse de l'ordre de ± 5 %. Sur des segments de contrôle de 320 m de long, les différences normales peuvent atteindre ± 5 % et il faut une différence de ± 10 % pour indiquer un changement du comportement de l'appareil de type-réponse.

e) Répétitions des mesures. Pour discerner des changements plus petits des performances d'un appareil de type-réponse on peut répéter les mesures. C'est surtout utile lorsque les sites de contrôle sont plus courts (1 km de long ou moins) ainsi que pour vérifier la répétabilité.

f) Identification des sites. Les points de départ et d'arrivée de chaque site doivent être reconnaissables à l'oeil nu grâce à des repères ou à des marques semi-permanentes prévues à cet effet. Immédiatement après l'étalonnage, il faut mesurer tous les sites de contrôle, comme pour n'importe quel segment de contrôle d'une route (c'est-à-dire, à vitesse constante, avec un équipement "échauffé"). Il faut enregistrer les mesures en vue de leur utilisation ultérieure.

g) Tolérances. Les mesures obtenues sur un site de contrôle à l'aide d'un appareil de type-réponse doivent toujours tomber dans des limites acceptables déterminées par les objectifs du projet et par les expériences antérieures faites avec l'appareil. Il ne faut pas oublier que les tolérences fixées pour les tests de contrôle ont un effet sur le niveau général de précision qui peut être associé à l'appareil de type-réponse. Les limites acceptables pour un appareil de type-réponse particulier doivent reposer sur les mesures initiales effectuées sur le site de contrôle avec ce même système. Il existe au moins trois techniques pour fixer les limites maximums et minimums de pente moyenne rectifiée acceptables pour un appareil de type-réponse donné. En désignant par PMR valeur actuelle de la pente moyenne rectifiée et par PMR_{init} la valeur initiale obtenue quand le site de contrôle a été mesuré pour la première fois, ces techniques peuvent s'exprimer des trois façons suivantes :

1) Limites exprimées en pourcentage : $PMR = PMR_{init} \pm 5\ \%$,

2) Limites exprimées en décibels (ou par incrément logarithmique) par exemple : $PMR = PMR_{init} \pm 1$ dB, ou $\log(PMR) = \log(PMR_{init}) \pm 0{,}05 \log(PMR)$,

3) Sous formes de limites linéaires, par exemple : $PMR = PMR_{init} \pm 5$ "comptages/km".

Les deux premières sont grossièrement équivalentes et conviennent quand l'erreur de mesure est en gros proportionnelle aux défauts d'uni. La troisième convient mieux quand l'erreur de mesure est à peu près constante dans l'ensemble des limites des défauts d'uni couverts par le projet. Lorsque les limites intéressantes comprennent surtout des routes revêtues et, en particulier, des routes relativement lisses comme les routes importantes, c'est la troisième méthode qui est recommandée. Lorsque les limites couvrent des routes non revêtues ou des routes revêtues très mauvaises, il est alors recommandé d'utiliser l'une des deux premières méthodes.

Il faut choisir le seuil exact à partir de l'expérience acquise avec un appareil de type-réponse réel (le chiffre de 5 % utilisé dans l'exemple ci-dessus peut, ou peut ne pas, s'appliquer).

h) Enregistrement des données. Comme dans d'autres domaines de collecte de données, l'utilisation de formulaires peut contribuer à réduire les erreurs humaines et à détecter les tendances dès qu'elles commencent à se manifester. Les figures 10 et 11 montrent des feuilles de calcul utilisées à cette fin (9). Dans cet exemple, les tests de contrôle englobaient à la fois les changements de sensibilité et de répétabilité de l'appareil de type-réponse. Par conséquent, il faut répéter les mesures sur les sites de contrôle. Chaque semaine, les mesures sont effectuées cinq fois sur plusieurs sites de contrôle. A l'aide de la feuille de calcul (figure 10), on établit la moyenne pour chaque site et on note les écarts entre les mesures (comme indication de la répétabilité). Le logarithme de la moyenne est comparé au logarithme de la mesure initiale et la difféence est reportée dans le tableau supérieur de la figure 11. Ainsi, toutes les tendances de la sensibilité de l'appareil de type-réponse aux défauts d'uni apparaissent visuellement. La différence est également reportée sur le graphique du bas de la figure 11, de sorte qu'il est facile de déceler précocement un comportement incohérent qui indiquerait que des éléments du système sont endommagés.

i) Fréquence des test. La fréquence à laquelle on doit effectuer les tests de contrôle résulte d'un compromis : des tests trop fréquents font perdre du temps qui pourrait être consacré à la collecte des données. En revanche, lorsque des problèmes sont découverts grâce à un test de contrôle, il y a moins de données perdues si le test précédent a été effectué récemment. On retiendra qu'il faut répéter les tests à intervalles suffisamment rapprochés pour que les données éventuellement perdues n'entraînent pas une perte de temps trop grave pour le projet.

Figure 10. Exemple de feuille de calcul utilisée pour enregistrer les données des tests de contrôle (9).

FEUILLE DE CALCUL POUR LES TESTS DE CONTROLE D'UN APPAREIL LID

DESIGNATION DE L'APPAREIL : LDI TP 125-555

OPERATEURS : Herman & Poppe DATE : 02/18/82

SEGMENT	22	24	26	32	
$\overline{X}$ initial	0.54	0.25	0.43	-0.15	
PASSAGE	LOG_{10} DES VALEURS DONNEES PAR LE LDI (m/km)				
1	0.53	0.21	0.44	-0.11	
2	0.53	0.25	0.44	-0.17	
3	0.54	0.25	0.43	-0.17	
4	0.53	0.25	0.42	-0.19	
5	0.54	0.22	0.43	-0.14	
TOTAL LOG_{10} (LDI)	2.67	1.18	2.16	-0.78	
X_{actuel}	0.53	0.24	0.43	-0.16	
ECART	0.01	0.01	0.00	0.01	
GAMMES DES ECARTS	0.01	0.04	0.02	0.08	

$$\overline{X}_{actuel} = \frac{\text{TOTAL } LOG_{10} \text{ (LDI)}}{5}$$

GAMMES DES ECARTS = $LDI_{max} - LDI_{min}$

ECART = $\overline{X}_{initial} - \overline{X}_{actuel}$

GAMMES DES ECARTS = A REPORTER SUR LE TABLEAU DE CONTROLE DES ECARTS

ECARTS = A REPORTER SUR LE TABLEAU DE CONTROLE DE LA MOYENNE

Figure 11. Exemple de tableau de report des moyennes et des écarts d'un test de controle d'un appareil de type-réponse (9).

TABLEAU DE CONTROLE DES MOYENNES LDI

DESIGNATION DE L'INSTRUMENT : LDI TP125-555 Date d'étalonnage : 11/05/81

MOYENNES INITIALES

SECTION	$\bar{X}$
2	0.30
4	0.23
6	0.32
7	0.18
8	0.15
10	0.07
11	0.04
12	0.05
13	0.44
14	0.38
17	0.45
22	0.54
24	0.25
25	0.13
26	0.43
27	-0.09
30	-0.18
32	-0.15
33	-0.13
34	-0.19

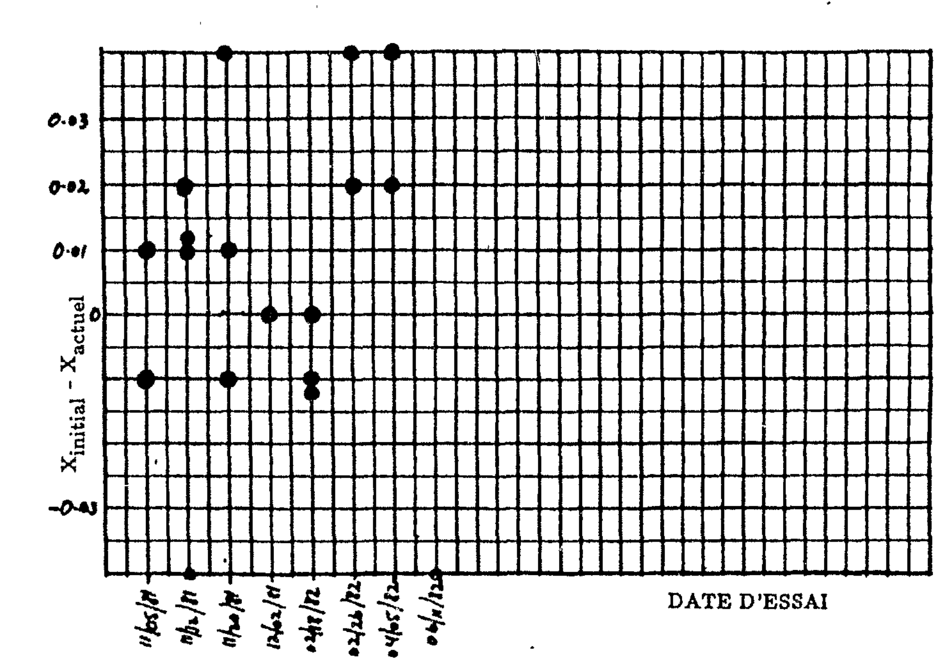
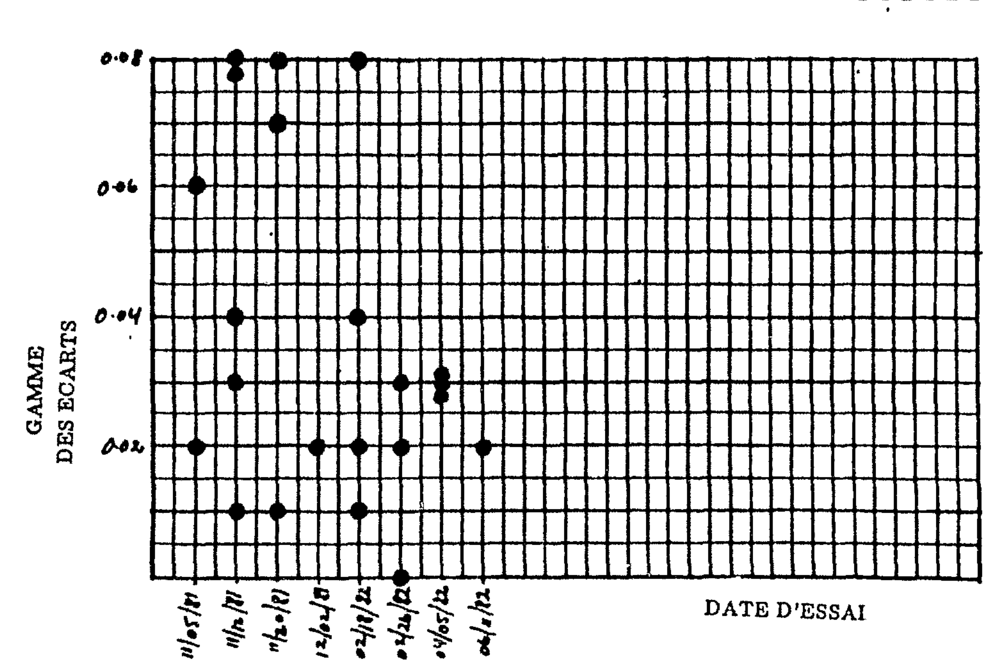


TABLEAU DE CONTROLE DES ECARTS LDI

DESIGNATION DE L'INSTRUMENT : LDI TP125-555 Date d'étalonnage : 11/05/81



CHAPITRE 5

EVALUATION SUBJECTIVE (CLASSE 4) DE L'IRI

5.1 Méthode d'évaluation descriptive

Lorsque les méthodes de classe 1, 2 ou 3 de mesure des défauts d'uni des routes ne sont pas applicables, on peut faire des évaluations subjectives à l'aide des descriptions de l'échelle IRI. Cette technique peut être mise en oeuvre aux stades initiaux d'un projet pour se faire une idée approximative de l'état de la route ou dans les cas où l'on ne dispose pas d'un appareil de type-réponse. Les descriptions qui suivent sont également utiles pour familiariser le personnel intéressé avec l'échelle IRI, en aidant à se faire une image concrète de la signification des différentes valeurs de l'IRI et des états de la chaussée correspondants.

5.1.1 Méthode. Cette méthode fournit des descriptions qualitatives (et pour certaines, quantitatives) de l'état de la chaussée et de sa roulance à différents niveaux de l'échelle IRI. Ces descriptions permettent à un observateur voyageant dans un véhicule et s'arrêtant occasionnellement pour inspecter la chaussée, de reconnaître son état et d'estimer les défauts d'uni. On peut se servir de photographies à l'appui de cette méthode mais elles peuvent induire en erreur en accentuant les défauts visibles à l'oeil nu et en réduisant les déformations ou les variations du profil qui se rapportent le plus étroitement à l'uni de la route.

Aucune méthode de ce type n'a été développée ni mise à l'épreuve de manière rigoureuse mais les succès enregistrés lors d'évaluations subjectives effectuées dans le cadre de l'Expérience internationale sur les défauts d'uni des routes amènent à penser que l'IRI peut être estimé avec une précision qui renseigne raisonnablement sur l'état des chaussées. En conséquence, le présent document donne des directives provisoires pour l'application de cette méthode.

La précision de la méthode varie généralement avec l'expérience de l'observateur. Les observateurs expérimentés sont souvent capables d'estimer les défauts d'uni avec une précision de 2 à 3 m/km, soit environ 30 %, tandis que les novices font des erreurs de 2 à 6 m/km, soit environ 40 %. Les estimations de l'IRI sont donc approximatives et la méthode ne doit pas être utilisée quand on dispose de moyens mécaniques.

5.1.2 Description de l'échelle de l'IRI. Les figures 12 et 13 donnent une série de descriptions correspondant à un certain nombre de niveaux de l'échelle des indices des défauts d'uni. La figure 12 concerne les surfaces en béton bitumineux et les chaussées traitées en surface, tandis que la figure 13 concerne les surfaces en gravier ou en terre battue. Les deux figures décrivent les catégories types de chaussées, les déformations de la surface, la roulance, et les vitesses types de déplacement associées aux différents niveaux. L'observateur doit tenir compte de tous ces éléments pour estimer les défauts d'uni d'une route tout en la parcourant. La description la plus objective se rapporte aux déformations superficielles, exprimées sous forme de tolérances mesurées à l'aide de la règle de 3 m; Ces déformations ne peuvent être évaluées que par une inspection à pied. Il est à noter que les descriptions et l'IRI correspondant à chaque niveau couvrent toute une plage d'états des routes. C'est inévitable étant donné que les combinaisons de défauts et de gravité de l'état des routes varient considérablement, et que deux routes classées au même niveau peuvent avoir un aspect très différent.

DEFAUTS D'UNI
(IRI en m/km)

Figure 12. Echelle d'évaluation des défauts d'uni des routes revêtues de béton bitumineux ou traités en surface (chipseal).

0

2

4

6

8

10

Conduite confortable au-dessus de 120 km/heure. Ondulations à peine perceptibles à 80 km/h situées dans les indices allant de 1,3 à 1,8. On ne remarque pas de dépressions, de nids de poule ou de tôle ondulée; les dépressions sont < 2 mm/3 m. Asphalte de haute qualité allant de 1,4 à 2,3, et traitement de surface de haute qualité 2,0 à 3,0.

Conduite confortable jusqu'à 100 à 120 km/h. Mouvements ou ondulations de grandes amplitudes modérément perceptibles à 80 km/h. Surfaces défectueuses : dépressions, rapiècements ou nids de poule occasionnels (par exemple, 5 à 15 mm/3 m ou 10 à 20 mm/5 m avec une fréquence de 2 à 1) ou de nombreux nids de poule peu profonds (par exemple, revêtement superficiel très abîmé). Surfaces sans défauts : légère tôle ondulée ou grandes ondulations.

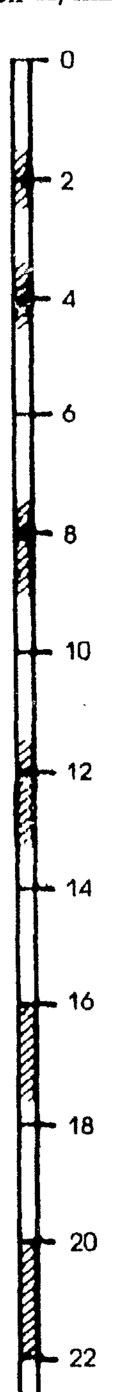
Conduite confortable jusqu'à 70 à 90 km/h. Mouvements fortement perceptibles et roulis. D'ordinaire associés à des défauts importants : dépressions et rapiècements fréquents et irréguliers (par exemple, 15 à 20 mm/3 m ou 20 à 40 mm/5 m avec une fréquence de 5 à 3 par 50 m), ou nids de poule occasionnels (par exemple, 1 à 3 par 50 m). Surfaces sans défauts : fortes ondulations et tôle ondulée.

Conduite confortable jusqu'à 50 à 60 km/h. Mouvements brusques et roulis fréquents. Associés à des défauts importants : dépressions et rapiècements fréquents, profonds et irréguliers (par exemple, 20 à 40 mm/3 m ou 40 à 80 mm/5 m, avec une fréquence de 3 à 5 par 50 m), ou nids de poule fréquents (par exemple, 4 à 6 par 50 m).

Il est nécessaire de réduire la vitesse à moins de 50 km/h. Grand nombre de dépressions importantes, nids de poule et effritements sérieux (par exemple, 40 à 80 mm de profondeur avec une fréquence de 8 à 16 par 50 m).

DEFAUTS D'UNI
(IRI en **m/km**)

Figure 13. Echelle d'évaluation des défauts d'uni des routes en graveleux ou en terre battue.



Surface en graviers fins récemment arasée, ou couche superficielle aux profils longitudinaux et transversaux excellents (ne se trouvent habituellement que sur de courts segments).

Conduite confortable jusqu'à 80 à 100 km/h, avec perception de petites ondulations ou d'un léger roulis. Dépressions négligeables (par exemple, < 5 mm/3 m) et pas de nids de poule.

Conduite confortable jusqu'à 70 à 80 km/h, mais avec perception de mouvements brusques et d'un certain rebondissement des roues. Fréquentes dépressions allant de peu profondes à modérées ou nids de poule peu profonds (par exemple, 6 à 30 mm/3 m avec une fréquence de 5 à 10 par 50 m). Tôle ondulée modérée (par exemple, 6 à 20 mm/0,7 à 1,5 m).

Conduite confortable à 50 km/h (ou 40 à 70 km/h sur des segments particuliers). Fréquentes dépressions transversales modérées (par exemple, 20 à 40 mm/3-5 m avec une fréquence de 10 à 20 par 50 m) ou dépressions et nids de poule occasionnels profonds (par exemple , 40 à 80 mm/3 m, avec une fréquence inférieure à 5 par 50 m). Tôle ondulée prononcée (par exemple, > 20 mm/0,7 à 1,5 m).

Conduite confortable à 30 à 40 km/h. Dépressions transversales et nids de poule fréquents et profonds (par exemple, 40 à 80 mm/1,5 m, avec une fréquence de 5 à 10 par 50 m); ou dépressions occasionnelles très profondes (par exemple, 80 mm/1,5 m à une fréquence inférieure à 5 par 50 m) avec d'autres dépressions peu profondes. Il est impossible d'éviter toutes les dépressions, sauf les plus importantes.

Conduite confortable de 20 à 30 km/h. Des vitesses supérieures à 40 à 50 km/h entraînent un inconfort extrême et éventuellement des dégâts à la voiture. Sur un bon profil général : dépressions profondes fréquentes ou nids de poule (par exemple, 40 à 80 mm/1,5 m à la fréquence de 10 à 15 par 50 m) dépressions très profondes occasionnelles (par exemple, > 80 mm/0,6-2 m). Sur un profil généralement médiocre : défauts modérés fréquents et dépressions très profondes (par exemple, > 80 mm/0,6 à 2 m). Sur un profil général : défauts et dépressions modérés fréquents (par exemple, surface médiocre en terre battue).

L'échelle des figures donne des IRI allant de 0 à 24 m/km, car c'est cette gamme de niveaux qui a été étudiée lors de l'Expérience internationale sur les défauts d'uni des routes, ainsi que dans d'autres projets. L'échelle réelle pourrait être étendue à des niveaux plus élevés, bien que l'état des chaussées serait alors si mauvais qu'il serait presque impossible d'y circuler. Pour décrire des niveaux-repères, comme dans les deux figures ci-dessus, il faut décrire les éléments suivants :

a) Catégories de chaussées. Les chaussées sont d'abord classées dans l'une de ces deux catégories : chaussées revêtuee et chaussées non revêtues, en raison des caractéristiques différentes des défauts présentés par ces deux types de chaussées. Les descriptions se réfèrent en outre à la qualité de la forme (c'est-à-dire du profil longitudinal) qu'on peut espérer pour chaque type de chaussée et chaque qualité de construction. Les descriptions comprennent tant la qualité de la forme après la construction de la route que l'étendue et le type des détériorations.

b) Défauts de forme superficiels. Il est important de savoir que l'uni de la route se rapporte uniquement aux changements de niveau verticaux de la chausséee dans les traces de roues du véhicule, et que l'aspect superficiel peut parfois induire en erreur. Les réparations de la surface ou une texture rugueuse sur laquelle les pneus deviennent bruyants peuvent conduire l'observateur à surestimer les défauts d'uni. A l'inverse, une surface dépourvue de défauts ou récemment colmatée peut conduire à sous-estimer les défauts d'uni. L'observateur doit donc concentrer son jugment sur les irrégularités de la surface dans le sens vertical. Les caractéristiques utilisées pour décrire la forme de la surface sont :

1) les dépressions : creux en forme d'assiettes dans les traces de roue, le revêtement restant en place (par extension, cette définition comprend également les bosses de dimensions comparables),

2) la tôle ondulée : dépressions tranversales régulièrement espacées traversant habituellement la voie de part en part, et ayant des longueurs d'onde de 0,7 à 3 m,

3) les nids de poule : trous dans la surface provoqués par la désintégration et la perte des matériaux du revêtement, et ayant des dimensions supérieures à 250 mm de diamètre et 50 mm de profondeur.

Comme pour les tolérances de construction, la taille des défauts est indiquée par l'écart maximum par rapport à une règle de 3 m, ce qui donne par exemple, 6 à 20 mm/3 m. La fréquence des défauts est qualifiée de :

"occasionnelle"	=	1 à 3 par 50 m dans l'une ou l'autre des traces,
"modérée"	=	3 à 5 par 50 m dans l'une ou l'autre des traces,
"fréquente"	=	plus de 5 par 50 m dans l'une ou l'autre des traces.

c) Roulance. Aux figures 12 et 13, la conduite "confortable" se rapporte à une voiture à conduite intérieure de taille moyenne, équipée d'amortisseurs indépendants normaux. Le confort de la conduite varie d'une voiture à l'autre et des descriptions plus détaillées ne seraient généralement pas transposables, mais un observateur peut rapidement s"étalonner" sur une voiture donnée. La roulance est la mesure sommaire des ondulations et les mouvements brusques ressentis par l'observateur à la vitesse correspondant au niveau de défauts d'uni à définir. Ces descriptions peuvent apporter une aide considérable, mais elles demandent à être établies en fonction des conditions locales et des types de véhicule.

d) Vitesse de déplacement. Ce terme est relatif aux vitesses courantes de déplacement sur des chaussées sèches, droites, en dehors des d'encombrements et en ménageant la voiture et le confort des passagers.

5.1.3 Personnel. Il faut choisir les observateurs parmis les personnes capables de porter des jugements cohérents et raisonnables; d'ordinaire, il s'agit d'ingénieurs, de techniciens des routes, etc. D'habitude, un seul observateur suffit, mais la précision du résultat peut être accrue en utilisant deux ou trois personnes.

5.1.4 Etalonnage. Afin d'étalonner les observations par rapport à l'échelle, l'observateur doit se familiariser le mieux possible avec les principaux éléments des descriptions précédentes. Cet exercice préalable pourrait s'appeler "étalonnage par description". En définitive, la validité de cet étalonnage dépend de l'exactitude des descriptions par rapport aux caractéristiques physiques de la surface de la route.

Il serait avantageux de commencer, si possible, la formation de l'observateur en le faisant circuler sur quelques segments de route couvrant une large gamme des défauts d'uni et pour lesquels l'IRI est connu à partir de mesures réelles. Si le véhicule qui doit être utilisé est très différent d'une voiture de tourisme en ce qui concerne l'empattement ou les caractéristiques de la suspension, il ne faut pas oublier d'adapter les descriptions utilisées, de préférence par "étalonnage" sur quelques segments mesurés à l'aide d'instruments. A l'inverse, ceci peut se faire par des inspections à pied et des comparaisons aussi précises que possibles entre les mesures de la forme et les éléments des descriptions.

5.1.5 Relevé. Sur les routes devant faire l'objet d'un relevé, le conducteur doit circuler à une vitesse normale de 80 km/h s'il s'agit d'une chaussée revêtue ou de 50 km/h s'il s'agit d'une chaussée non revêtue. Parfois, l'observateur peut souhaiter faire varier la vitesse pour vérifier les observations par rapport aux descriptions de la roulance. Il faut faire une estimation de l'IRI moyen à des intervalles de 1 km (50 ou 70 secondes), bien que sur les routes longues et uniformes cet intervalle puisse être porté à 2 ou 5 km, en fonction de la précision et des détails demandés pour le relevé. Il est utile de s'arrêter occasionnellement pour effectuer des mesures ponctuelles. Il faut noter la vitesse du véhicule, le type de surface et les conditions météorologiques.

5.1.6 Traitement des données. On peut calculer la moyenne des valeurs estimées sur chaque segment de chaussée pour déterminer l'uni moyen de la chaussée. Si les niveaux estimés diffèrent fortement, de 100 % par exemple, il faut subdiviser la routes en segments homogènes pour calculer la moyenne.

5.2 Evaluation du confort de la route (ou roulance) par un comité d'usagers

Dans le passé, des évaluations de la roulance des routes étaient fréquemment conduites à l'aide de comité d'usagers. Des passagers pris comme observateurs classaient le confort des sections de route sur une échelle arbitraire allant d'excellent à très mauvais (non carrossable), ou souvent sur une échelle numérique de 5 à 0. D'ordinaire, cette évaluation était liée à l'indice de pratiquabilité (ou indice PSI développé à l'occasion des essais de routes de l'AASHO, ou à un indice de confort de conduite). L'échelle de l'indice de praticabilité est limitée en ce sens qu'elle a été établie pour des routes de relativement bonne qualité, du moins si on les compare au moins bonnes routes couvertes par l'IRRE qui sont plus représentatives des conditions rencontrées dans les pays en développement. Ainsi, l'échelle de l'indice de praticabilité, telle qu'elle est utilisée habituellement aux Etats-Unis, ne couvre que le bas de l'échelle de l'IRI (la partie la meilleure). Les données permettant d'établir des rapports entre l'échelle PSI et l'échelle IRI, ainsi qu'avec d'autres mesures objectives des défauts d'uni, sont rares et incohérentes, en partie en raison des méthodes différentes utilisées par les organismes

évaluant l'indice PSI. Certaines relations sont linéaires alors que d'autres ne le sont pas (10). Un indice PSI de 5 correspond à une surface parfaite et il est donc équivalent à 0 sur l'échelle de l'indice IRI. Celui-ci augmente au fur et à mesure que les défauts sont plus importants alors que l'indice PSI descend à 0 pour une surface complètement impraticable.

L'expérience a montré que, selon les pays ou les régions, les observateurs des comités d'usagers attribuent des évaluations très différentes à un même segment de route, en fonction de ce que le confort d'une route représente pour eux. Les échelles d'évaluation établies par des comités d'usagers ne sont donc pas comparables à moins d'avoir une base très ferme et cette méthode ne peut être considérée comme appartenant à la classe 4, à moins que des mesures particulières n'aient été prises pour établir l'échelle sur une base solide, à l'aide d'un étalonnage par rapport à l'indice IRI. L'avantage possible de la méthode est que les évaluations des routes sont vraiment représentatives de l'opinion subjective des usagers. Cependant, dans la plupart des applications, ces types de données ne constituent pas la priorité essentielle. En général, il est souhaitable d'utiliser une échelle dont la signification ne change pas d'une année à l'autre ni d'une région à une autre. Bien que les estimations subjectives des comités d'usagers puissent être "accrochées" à une échelle stable dans le temps telle que celle de l'indice IRI, la méthode est coûteuse et peu précise par comparaison avec les autres méthodes disponibles. Les évaluations par des comités d'usagers ne sont donc pas recommandés pour obtenir des mesures de l'indice IRI, ni pour aucune autre application, sauf pour les recherches dans lesquelles l'opinion publique ou professionnelle locale présente un intérêt.

GLOSSAIRE

Analyse des gammes d'ondes APL 72 - Le profil est filtré en trois bandes : ondes courtes, ondes moyennes et grandes ondes. Ses éléments sont :

a) l'"énergie" (W) APL 72, qui est la moyenne des carrés du profil filtré dans gamme d'ondes,

b) l'"amplitude équivalente" APL 72, qui est l'amplitude d'une onde sinusoïdale de même énergie (E),

c) l'indice APL 72, qui est une valeur située entre 1 (le plus mauvais) et 10 (le meilleur) et indique la qualité relative de la route.

C'est la valeur numérique de la gamme des ondes courtes qui offre la meilleure corrélation avec l'indice IRI et avec les mesures de l'appareil de type-réponse. Un ensemble analogue de trois valeurs numériques correspondant aux gammes d'ondes (CP) est utilisé en Belgique par le Centre de recherches routières.

Appareils de type-réponse - Ces appareils se composent d'une voiture de tourisme ou d'une remorque à une ou à deux roues et d'un indicateur de roulance installé de façon à mesurer les mouvements de la suspension.

Appareil de type-réponse à deux pistes - Appareil de type-réponse basé sur une voiture de tourisme, une camionnette ou une remorque à deux roues. La mesure obtenue est fonction des défauts d'uni dans les deux traces de roue.

Appareil de type-réponse à une seule trace - Remorque supportée par une roue unique et équipée d'un indicateur de roulance. La mesure des défauts d'uni obtenue ne s'applique qu'à une seule trace de roue.

APL **25** - Voir "CAPL 25".

AVQ - Abréviation d'"accélération verticale quadratique". Cette mesure a été proposée par McKenzie et Srinarawat[2] comme référence d'étalonnage basée sur le profil. Cette valeur numérique est fonction d'un signal de profil mesuré et d'un paramètre unique de longueur de référence. L'accélération verticale (AV) est définie à chaque position longitudinale x par l'équation suivante : $AV_b = [Y(x + b) + Y(x - b) - 2\,Y(x)] / b^2$, dans laquelle Y(x) est l'amplitude du signal (cote du profil) à la position x et b le paramètre de la longueur de référence. Dans cette définition donnée par l'équation ci-dessus, l'AVQ est exprimée en unités d'accélération verticale, mais n'a pas de rapport avec l'accélération spatiale réelle du profil. C'est simplement une mesure de l'écart au milieu de la corde, avec un facteur d'échelle de $2/b^2$. L'élément numérique AVQ a été utilisé pour définir la norme d'étalonnage IQ_r dans le projet PICR, et a également été utilisé pour définir une norme d'étalonnage des appareils de type-réponse pour le Texas.

---

2 "Accélération verticale quadratique (AVQ) comme base du calibrage Mays Meter". Brazil Project Memo BR-23, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, February 1978.

CAPL 25 - Valeur numérique obtenue sur une remorque de mesure APL circulant à la vitesse de 21,6 km/h. Elle implique toute une technique d'analyse et d'essai utilisée couramment en France pour l'évaluation des routes nouvellement construites. La valeur CAPL 25 est calculée pour chaque segment de route de 25 m.

Comptages/km, comptages/mille - Voir "mesures/km, mesures/mille".

CP - Coefficient de planéité ou coefficient d'uni, utilisé comme mesure de l'uni des routes par le Centre belge de recherches routières (CRR). Le coefficient CP est la valeur rectifiée d'un profil, lissée à l'aide d'une moyenne mobile. 50 CP = 1 mm. Les coefficients CP sont établis à l'aide de bases d'environ 2,5, 10 et 40 m quand ils sont calculés à partir de profils APL 72, et à l'aide de bases de 2,5 et 15 m quand ils sont calculés à partir du profil APL 25. Les valeurs CP(2,5) et CP(10) peuvent être obtenues par d'autres méthodes de mesure du profil, à condition d'utiliser des intervalles petits entre les points de relèvement. La corrélation entre le coefficient CP(2,5), l'indice IRI et les mesures prises avec les appareils de type-réponse est très élevée.

Défauts d'uni d'une route ou plus simplement "uni" - Variations longitudinales de la hauteur de la surface de la route occasionnant des vibrations dans les véhicules qui la parcourent. La mesure de ces variations est normalement exprimée par l'indice IRI (voir ce mot).

IRRE - (International Road Roughness Experiment) Expérience internationale sur les défauts d'uni des routes, qui s'est tenue au Brésil en 1982. Cette expérience a été conduite par des équipes de recherche venant du Brésil, d'Angleterre, de France, de Belgique et des Etats-Unis.

Gamme d'ondes - Gamme de fréquences transposée dans l'espace (nombre d'onde = 1/longueur d'onde). La gamme d'ondes ne comprend que les nombres d'onde qui font partie de la gamme.

GMR - (General Motors Research). Voir "Profilographe inertiel GMR".

IRI - (International Roughness Index) Indice international des défauts d'uni des routes. Il est équivalent à la pente moyenne rectifiée, quand on utilise un appareil de type-réponse de référence à une vitesse normalisée de 80 km/h. C'est une propriété mathématique du profil d'une trace de roue choisie dans une voie. Il repose sur une référence d'étalonnage établie au cours d'un programme NCHRP (2), et s'est révélé par la suite comme l'indice des défauts d'uni le plus approprié à une utilisation internationale dans l'expérience IRRE.

Indicateur de roulance - Instrument monté sur un véhicule et destiné à transmettre et à additionner les mouvements de la suspension quand le véhicule parcourt une route. La mesure fournie est proportionnelle au total des mouvements de la suspension accumulés au cours de l'essai.

Indice des défauts d'uni - voir "IRI" (Indice international des défauts d'uni)

IQ - Indice des défauts d'uni adopté comme norme d'étalonnage dans le projet brésilien PICR commencé en 1975 et concernant les coûts pour l'usager. Par sa conception, l'IQ est identique à l'IRI et, en pratique, la corrélation entre ces deux indices est très élevée. Il s'agit d'une mesure de la pente moyenne rectifiée, effectuée en choisissant arbitrairement des "mesures"/km. Elle est basée sur une simulation de référence ancienne d'un appareil de type-réponse. L'IQ d'origine était l'abréviation d'"Indice quart de voiture" et il reposait sur la lecture effectuée avec un appareil particulier sur les routes revêtues du Brésil. En raison de plusieurs défauts présentés par les appareils et d'erreurs dans la méthode d'étalonnage, les mesures IQ d'origine ne peuvent être reprises aujourd'hui avec la même méthode. Depuis le début du projet PICR, il y a eu trois types de données IQ :

1) **IQ_r** - Mesure des défauts d'uni basée sur le profil et développée par Queiroz et d'autres chercheurs brésiliens pour remplacer l'échelle d'étalonnage IQ. L'indice IQ_r est calculé à partir d'un profil unique mesuré statistiquement, en général avec la méthode de la mire et du niveau, à l'aide d'une somme pondérée de deux valeurs AVQ, calculées à partir de bases de 1,0 et de 2,5 m :

$$IQ_r = -8{,}54 + 6{,}17\ AVQ_{1,0} + 19{,}38\ AVQ_{2,5}$$

L'équation ci-dessus demande que les mesures soient exprimées en unités de 1/km (0,001/m), comme on les obtient lorsque les cotes du profil sont mesurées en mm. Conçu pour les analyses de profil à l'aide de la mire et du niveau, l'indice IQ_r ne peut pas être mesuré par autant de méthodes que l'indice IRI. Ainsi, dans certaines conditions, la corrélation avec les mesures des appareils n'est pas tout à fait aussi bonne.

2) **IQ^*** - Mesures "étalonnées" des appareils de type-réponse, utilisées pour toutes les données mesurées lors du projet PICR, telles qu'elles ont été reportées et mises en mémoire dans les fichiers informatisés brésiliens. L'étalonnage utilisé n'était pas complet et ne corrigeait pas les mesures par rapport à l'échelle IQ pour tous les types de surfaces. Sur les routes de béton bitumineux, IQ^* est équivalent à IQ_r; cependant, les valeurs numériques de IQ^* sont supérieures aux mesures correspondantes IQ_r sur routes non revêtues, et de beaucoup supérieures (parfois de 100 %) sur les routes traitées en surface.

3) **IQw^*** - Des ingénieurs consultants de la Banque mondiale ont traité à nouveau les données des défauts d'uni obtenues lors du projet IRRE. Quand elles seront publiées, les équations relatives aux coûts se révèleront différentes des équations d'origine, car elles ont été remises à l'échelle pour les rapprocher des valeurs de l'indice IQ_r sur tous les types de routes.

On peut considérer l'indice IQ comme une version ancienne de l'indice IRI. Bien que les définitions initiales de l'indice IQ soient difficilement applicables avec confiance dans la plupart des cas, les données de l'expérience IRRE indiquent que, dans la pratique, IQ peut être considéré comme un indice IRI dont les unités sont différentes et décalées. L'équation de conversion recommandée est la suivante :

$$E\ (IQ_r)\ \text{"mesures/km"} = 14 \times IRI\ (m/km) - 10$$

Intégrateur de choc - (Bump Integrator ou BI). Indicateur de roulance utilisé par le Laboratoire britannique de recherche sur les routes et les transports (Transport and Road Research Laboratory ou TRRL). Il est dérivé du système à embrayage rotationnel utilisé sur l'ancien rugosimètre BPR. Les mesures sont d'ordinaire exprimées en mm/km. La mesure brute correspond à la moitié du total des déflections accumulées de la suspension; en conséquence, il faut multiplier les résultats par deux pour obtenir la pente moyenne rectifiée.

Mays Meter - Indicateur de roulance commercialisé par la société Rainhart. Le capteur utilise un codeur optique pour produire des impulsions électriques qui sont accumulées mécaniquement par un moteur pas à pas unidirectionnel relié à un enregistreur graphique. L'appareil mesure les mouvements accumulés de la suspension en pouces/6,4 et les indications sont reportées automatiquement grâce à l'avancement du papier de l'enregistreur. Cette mesure est alors convertie en pouces/mille par la plupart des utilisateurs. Bien que le capteur fonctionne de façon satisfaisante sur les routes, quels que

soient les défauts d'uni, le moteur pas à pas a des seuils de réponse qui occasionnent des erreurs de comptage quand les routes sont mauvaises.

Mesures/km, mesures/mille - Expressions se rapportant aux valeurs utilisées pour le calcul de la pente moyenne rectifiée. Dans ces expressions, les "mesures" se rapportent normalement aux incréments des mouvements de la suspension mesurés par l'indicateur de roulance. Ces expressions ont également été utilisées pour désigner les sommes des carrés des mesures prises par un appareil PCA, ce qui n'a aucun rapport avec la pente moyenne rectifiée.

mm/km - Unité de mesure de la pente moyenne rectifiée. On l'utilise habituellement avec la remorque à intégrateur de vibrations. Les valeurs données par l'intégrateur de vibrations sont généralement la moitié de celles utilisées pour le calcul de la pente moyenne rectifiée.
En conséquence, 1 mm/km PMR = 500 mm/km avec l'intégrateur de vibrations.

Moyenne mobile - Méthode d'analyse utilisée pour calculer l'indice des défauts d'uni à partir du profil mesuré. La moyenne mobile sert à lisser le profil en remplaçant chaque point par la moyenne des points contigus sur une distance de référence spécifiée. Le profil lissé est soustrait du profil d'origine pour annuler les reliefs de grande longueur d'onde. Le profil filtré qui en résulte est résumé sous forme de moyenne rectifiée ou par une valeur quadratique. Si la longueur de référence a été choisie de manière appropriée (de 1,5 m à 3 m), il existe une corrélation élevée avec les mesures des appareils de type-réponse. Cette analyse est utilisée principalement pour isoler les propriétés des défauts d'uni auxquelles on s'intéresse et qui sont souvent impossibles à déceler avec les appareils de type-réponse.

NAASRA-graphe (NAASRA Meter) - Indicateur de roulance mis au point et utilisé par le Comité australien de recherche sur les routes (Australian Road Research Board ou ARRB) en même temps qu'un véhicule de référence, en vue de définir un appareil de type-réponse pour le NAASRA. L'indicateur de roulance NAASRA s'est révélé capable de prendre les mesures nécessaires au calcul de la pente moyenne rectifiée (PMR) et de la vitesse moyenne rectifiée (VMR) dans toute la gamme des défauts d'uni des routes. L'appareil de type-réponse-NAASRA utilisé en Australie a été "étalonné" en stockant un système complet pour servir de référence et établir les corrélations avec les systèmes en service.

PCA-mètre (PCA Meter) - Instrument analogue à un indicateur de roulance dans lequel la somme des écarts discrets (déflections) de la suspension est faite indépendamment. La plupart des PCA-mètres peuvent également servir d'indicateur de roulance ordinaire en additionnant simplement les lectures de tous les compteurs.

$PMRR_{80}$ - Pente moyenne rectifiée correspondant à une vitesse normalisée de 80 km/h. C'est l'appellation plus technique de l'indice IRI.

PMR_v - Pente moyenne rectifiée, mesurée par un appareil de type-réponse à la vitesse V. Les unités recommandées sont les m/km, bien que les unités "pouces/mille" (inches/mile) et "mm/km" se rencontrent aussi couramment. Il s'agit du total des déflections de la suspension d'un appareil de type-réponse (dans les deux sens) divisé par la distance parcourue pendant les mesure de l'uni. Les indicateurs de roulance du type du rugosimètre BPR (BPR Roughometer) produisent des mesures égales à PMR/2, puisqu'ils n'accumulent les déflections de la suspension que dans un seul sens.

Pouces/mille anglais (2,54 cm/1609,34 m) - Unité de mesure de la pente moyenne rectifiée. Elle donne une indication des déflections de la suspension en pouces par mille de distance parcourue (1 m/km = 63,36 pouces/mille).

Poutre TRRL - Profilographe pratiquement statique mis au point par le laboratoire britannique TRRL pour mesurer un profil par segments de 3 m (longueur de l'instrument). La poutre TRRL est conçue pour les conditions rencontrées dans les pays en développement : elle est légère, portative et autonome. Elle comprend un micro-ordinateur alimenté par batteries qui commande les mesures et calcule automatiquement les valeurs relatives aux défauts d'uni.

Précision - Valeur quadratique moyenne de l'erreur lorsqu'on compare des mesures obtenues par une méthode particulière à celles d'une méthode de référence.

Profilographe ou profilomètre - Instrument mobile en usage pour la mesure du profil longitudinal des routes. Un profilographe possède ses propres moyens d'étalonnage, différents des méthodes empiriques par régression nécessaires avec les appareils de type-réponse. La mesure du profil peut ne pas être absolument vraie en ce sens qu'elle ne comprend pas toutes les longueurs d'onde, tout en étant quand même valable pour les mesures de l'uni des routes et pour les opérations d'étalonnage. Selon l'instrument, le profil peut être mis en mémoire en vue d'être utilisé ultérieurement, ou traité à bord du profilomètre pour fournir des valeurs récapitulatives pendant les mesures. Les profilomètres à **grande vitesse** sont des instruments pouvant être utilisés aux vitesses normales sur les routes, tandis que les profilomètres **statiques** sont utilisés à la vitesse de la marche à pied (ou à des vitesses inférieures).

Profilomètre inertiel GMR - Fourgon équipé d'instruments, mis au point par le Département de recherche de la société General Motors, commercialisé par la société K.J. Law Engineers, et destiné à la mesure des profils à des vitesses courantes sur les routes à grande circulation. Les premiers profilographes mesuraient le profil à l'aide d'un accéléromètre, d'une roue palpeuse équipée d'instruments et de circuits électroniques analogiques. Les modèles plus récents sont équipés de capteurs sans contact et de circuits binaires de traitement des signaux. Depuis 1979, ils sont équipés d'un logiciel pour calculer l'indice IRI au moment même des mesures. Ce programme de calcul s'appelle simulation Mays Meter.

Profilomètre suédois VTI au laser - Fourgon équipé d'un profilomètre, mis au point et utilisé par le service VTI suédois. Ce profilographe fonctionne aux vitesses routières normales et met en oeuvre un ensemble d'accéléromètres, de capteurs sans contact et de circuits binaires pour mesurer plusieurs profils longitudinaux parallèles répartis sur toute la largeur de la voie (de 2,5 m à 3 m).

Profilomètre TRRL à laser - Profilomètre à grande vitesse, conçu et mis en service par le laboratoire britannique TRRL. Il utilise plusieurs capteurs à laser espacés le long de la remorque de mesure, pour calculer le profil de la surface pendant que la remorque est tractée à vitesse routière normale, sur les voies à grande circulation.

Profilographes K.J. Law - Voir "Profilomètre inertiel GMR".

Profilomètres - voir "profilographe".

Remorque de mesure APL - Profilomètre à grande vitesse, mis au point et utilisé par le Laboratoire central des ponts et chaussées. La remorque est équipée d'un système mécanique accordé pour mesurer le profil de surface d'une trace de roue unique, dans la gamme des fréquences de 0,5 à 20 Hz.

Remorque à intégrateur de vibrations - Appareil de type-réponse se composant d'une remorque spéciale à une seule roue équipée d'un indicateur de roulance intégrateur de vibrations. La remorque a été mise au point par le Laboratoire britannique TRRL, en se basant sur une conception similaire à l'ancien rugosimètre BPR. Autrefois, la remorque à intégrateur de vibrations n'était utilisée qu'à

la vitesse de 32 km/h; cependant, les résultats de l'expérience IRRE montrent qu'on peut obtenir de bons résultats à des vitesses supérieures.

Répétabilité - Ecart type des mesures obtenues par des essais répétés, au moyen du même instrument, sur une route unique choisie au hasard.

Reproductibilité - Ecart type de l'erreur sur une seule mesure, par rapport à une mesure de référence. La reproductibilité des mesures d'un instrument inclut des erreurs systématiques caractéristiques de cet instrument, mais aléatoires en ce qui concerne un essai particulier.

Résolution - Le plus petit incrément que peut mesurer un instrument particulier, par construction.

Ridemeter - Nom anglais d'un ensemble d'instruments montés sur un véhicule pour mesurer les vibrations. Dans certains documents, le mot Ridemeter désigne un indicateur de roulance; dans d'autres il s'applique à des instruments qui mesurent le confort ou la roulance mais non les défauts d'uni de la route.

Rugosimètre BPR - Appareil de type-réponse ancien mis au point par le Bureau des voies publiques (Bureau of Public Roads). Il s'agit d'une remorque de mesure à roue unique, équipée d'un indicateur de roulance mécanique muni d'un embrayage à rochet et utilisé à l'origine à la vitesse de 32 km/h. Du point de vue de sa conception, le rugosimètre BPR est analogue à la remorque à intégrateur de vibrations, mais il n'est d'ordinaire ni aussi robuste, ni aussi standardisé.

Simulation Mays Meter - Logiciel commercialisé par la société K.J. Law Engineers avec le profilographe GMR. Dans certaines versions, ce logiciel est exactement adapté à l'indice IRI (en pouces/mille et non en m/km); dans d'autres, il utilise les paramètres de la voiture relatifs à l'indice IRI pour obtenir une simulation "demi-voiture", plutôt que la simulation quart de voiture spécifiée pour l'IRI.

Somme des carrés PCA - Mesure obtenue par un PCA-mètre, chacune des lectures des différents compteurs étant pondérée avant d'être additionnées aux autres. La mesure qui en résulte était sensée indiquer une réponse quadratique, mais il a été démontré que la somme pondérée n'avait aucun rapport avec les variables physiques (2). L'utilisation de cette mesure est déconseillée.

SQV (Simulation quart de voiture) - Modèle mathématique d'un véhicule muni d'une carrosserie et d'une seule roue. Il permer de calculer la réponse d'un véhicule de référence à partir du profil mesuré.

Trace de roue - Chemin parcouru par le pneu d'un véhicule parcourant une route. Chaque voie comporte deux traces. Lors de la mesure des défauts d'uni, la trace de roue doit être autant que possible parallèle à la ligne médiane de la voie - Frayée (en Belgique).

TRRL (Transport and Road Research Laboratory) - Voir "Intégrateur de choc" et "Remorque à intégrateur de vibrations".

Uni - Voir "Défauts d'uni d'une route".

Variance de la pente (VP) - Mesure des défauts d'uni d'une route exprimée par la variance d'un signal produit par l'ancien profilographe AASHTO et par le profilomètre CHLOE. Quand elle est utilisée pour décrire les défauts d'uni, la variance de la pente se rapporte à la variance d'un signal ou "profil" obtenu selon un procédé particulier. La variance de la pente est plus sensible à la méthode de mesure du profil choisie qu'aux défauts d'uni et elle ne décrit pas une mesure standard des défauts d'uni (la

"vraie" variance de la pente d'un profil de route est infinie, puisque le "vrai" profil comprend les effets de la texture). Bien que la géométrie simple des "profilographes" anciens implique que la variance de la pente puisse être calculée mathématiquement sans difficulté à partir de mesures de profil précises, les anciens systèmes de mesure présentaient des anomalies et des complexités mal connues et les estimations de la variance de la pente faites à partir des profils mesurés ne sont pas équivalentes aux données fournies par les intruments anciens. Les mesures de la variance de la pente ne se sont jamais révélées très compatibles avec les mesures de la pente moyenne rectifiée et de la vitesse moyenne rectifiée obtenues avec des systèmes SMDRRT.

VMRR (vitesse moyenne rectifiée de référence) - La VMRR est donnée par l'équation : VMRR = PMR x vitesse, dans laquelle on obtient la pente moyenne rectifiée (PMR) à partir de la simulation quart de voiture du véhicule de référence.

VMR_V - Vitesse moyenne rectifiée mesurée par un appareil de type-réponse. C'est la vitesse moyenne de battement de la suspension du véhicule pendant une mesure des défauts d'uni. La VMR est une mesure directe des réponses du véhicule aux défauts d'uni. Une augmentation de la VMR indique toujours une augmentation des vibrations du véhicule, quelle que soit la vitesse à laquelle sont faites les mesures ou la source des vibrations. La VMR est donnée par l'équation : VMR = PMR x vitesse, dans laquelle la vitesse est exprimée dans les unités appropriées.

REFERENCES

1. Sayers, M.W., Gillespie, T.D. et Queiroz, C.A.V., The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements. Document technique No 45. Banque mondiale, Washington, D.C., 1986.

2. Gillespie, T.D., Sayers, M.W. et Segel, L., Calibration of Response-Type Road Roughness Measurement Systems, National Cooperative Highway Research Program Report 228, Académie nationale des sciences, Washington, D.C., 1980.

3. The Ann Arbor Road Profilometer Meeting. Report FHWA/RD-86/100, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 1986, 226p.

4. Analyseur de profil en long - APL 72, Bulletin 1 B AC 76, Matériels de laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 1976.

5. Mesure de l'uni des couches de chaussées avec l'analyseur dynamique de profil en long type APL 25, Avant-projet de mode opératoire, Division des structures et caractéristiques des chaussées, Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, 1980.

6. Spangler, E.B. et Kelly, W.J., "GMR Road Profilometer - A Method for Measuring Road Profile", Highway Research Record 121, Académie nationale des sciences, Washington, D.C., 1966.

7. Specification No. S8300m, Road Roughness Surveyor, K. J. Law Engineers, Inc., Farmington Hills, Michigan, novembre 1983.

8. Paterson, W.D.O., "Accuracy of Calibrated Roughness Surveys" dans Measuring Road Roughness and its Effects on User Cost and Comfort, Special Report STP884, American Society for Testing and Materials, Philadelphie, Pa., 1985, pp. 66-88.

9. Visser, A.T. et Curtayne, P.C., The Routine Operation, Calibration and Control of the Linear Displacement Integrator, Report No. RC/7/82, National Institute for Transport and Road Research, Pretoria, 1982.

10. Paterson, W.D.O., Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management, Highway Design and Maintenance Standard Series, Baltimore, Md.: John Hopkins University Press pour la Banque mondiale. 1987, 454 pp.

Distributors of World Bank Publications

ARGENTINA
Carlos Hirsch, SRL
Galeria Guemes
Florida 165, 4th Floor-Ofc. 453/465
1333 Buenos Aires

AUSTRALIA, PAPUA NEW GUINEA, FIJI, SOLOMON ISLANDS, VANUATU, AND WESTERN SAMOA
D.A. Books & Journals
648 Whitehorse Road
Mitcham 3132
Victoria

AUSTRIA
Gerold and Co.
Graben 31
A-1011 Wien

BAHRAIN
Bahrain Research and Consultancy Associates Ltd.
P.O Box 22103
Manama Town 317

BANGLADESH
Micro Industries Development Assistance Society (MIDAS)
House 5, Road 16
Dhanmondi R/Area
Dhaka 1209

Branch offices:
156, Nur Ahmed Sarak
Chittagong 4000

76, K.D.A. Avenue
Kulna

BELGIUM
Publications des Nations Unies
Av. du Roi 202
1060 Brussels

BRAZIL
Publicacoes Tecnicas Internacionais Ltda.
Rua Peixoto Gomide, 209
01409 Sao Paulo, SP

CANADA
Le Diffuseur
C P 85, 1501B rue Ampère
Boucherville, Quebec
J4B 5E6

CHINA
China Financial & Economic Publishing House
8, Da Fo Si Dong Jie
Beijing

COLOMBIA
Enlace Ltda.
Apartado Aereo 34270
Bogota D.E.

COTE D'IVOIRE
Centre d'Edition et de Diffusion Africaines (CEDA)
04 B P 541
Abidjan 04 Plateau

CYPRUS
MEMRB Information Services
P.O. Box 2098
Nicosia

DENMARK
SamfundsLitteratur
Rosenoerns Allé 11
DK-1970 Frederiksberg C

DOMINICAN REPUBLIC
Editora Taller, C. por A.
Restauracion e Isabel la Catolica 309
Apartado Postal 2190
Santo Domingo

EL SALVADOR
Fusades
Avenida Manuel Enrique Araujo #3530
Edificio SISA, 1er. Piso
San Salvador

EGYPT, ARAB REPUBLIC OF
Al Ahram
Al Galaa Street
Cairo

The Middle East Observer
8 Chawarbi Street
Cairo

FINLAND
Akateeminen Kirjakauppa
P.O. Box 128
SF-00101
Helsinki 10

FRANCE
World Bank Publications
66, avenue d'Iéna
75116 Paris

GERMANY, FEDERAL REPUBLIC OF
UNO-Verlag
Poppelsdorfer Allee 55
D-5300 Bonn 1

GREECE
KEME
24, Ippodamou Street Platia Plastiras
Athens-11635

GUATEMALA
Librerias Piedra Santa
Centro Cultural Piedra Santa
11 calle 6-50 zona 1
Guatemala City

HONG KONG, MACAO
Asia 2000 Ltd.
Mongkok Post Office
Bute Street No. 37
Mongkok, Kowloon
Hong Kong

HUNGARY
Kultura
P.O. Box 149
1389 Budapest 62

INDIA
Allied Publishers Private Ltd.
751 Mount Road
Madras - 600 002

Branch offices:
15 J.N. Heredia Marg
Ballard Estate
Bombay - 400 038

13/14 Asaf Ali Road
New Delhi - 110 002

17 Chittaranjan Avenue
Calcutta - 700 072

Jayadeva Hostel Building
5th Main Road Gandhinagar
Bangalore - 560 009

3-5-1129 Kachiguda Cross Road
Hyderabad - 500 027

Prarthana Flats, 2nd Floor
Near Thakore Baug, Navrangpura
Ahmedabad - 380 009

Patiala House
16-A Ashok Marg
Lucknow - 226 001

INDONESIA
Pt. Indira Limited
Jl. Sam Ratulangi 37
P.O. Box 181
Jakarta Pusat

IRELAND
TDC Publishers
12 North Frederick Street
Dublin 1

ITALY
Licosa Commissionaria Sansoni SPA
Via Benedetto Fortini, 120/10
Casella Postale 552
50125 Florence

JAPAN
Eastern Book Service
37-3, Hongo 3-Chome, Bunkyo-ku 113
Tokyo

KENYA
Africa Book Service (E.A.) Ltd.
P O. Box 45245
Nairobi

KOREA, REPUBLIC OF
Pan Korea Book Corporation
P O. Box 101, Kwangwhamun
Seoul

KUWAIT
MEMRB Information Services
P O. Box 5465

MALAYSIA
University of Malaya Cooperative Bookshop, Limited
P.O. Box 1127, Jalan Pantai Baru
Kuala Lumpur

MEXICO
INFOTEC
Apartado Postal 22-860
14060 Tlalpan, Mexico D.F.

MOROCCO
Societe d'Etudes Marketing Marocaine
12 rue Mozart, Bd. d'Anfa
Casablanca

NETHERLANDS
InOr-Publikaties b.v.
P.O. Box 14
7240 BA Lochem

NEW ZEALAND
Hills Library and Information Service
Private Bag
New Market
Auckland

NIGERIA
University Press Limited
Three Crowns Building Jericho
Private Mail Bag 5095
Ibadan

NORWAY
Narvesen Information Center
Bertrand Narvesens vei 2
P O. Box 6125 Etterstad
N-0602 Oslo 6

OMAN
MEMRB Information Services
P.O. Box 1613, Seeb Airport
Muscat

PAKISTAN
Mirza Book Agency
65, Shahrah-e-Quaid-e-Azam
P O. Box No. 729
Lahore 3

PERU
Editorial Desarrollo SA
Apartado 3824
Lima

PHILIPPINES
National Book Store
701 Rizal Avenue
P.O. Box 1934
Metro Manila

POLAND
ORPAN
Palac Kultury i Nauki
00-901 Warszawa

PORTUGAL
Livraria Portugal
Rua Do Carmo 70-74
1200 Lisbon

SAUDI ARABIA, QATAR
Jarir Book Store
P.O. Box 3196
Riyadh 11471

MEMRB Information Services
Branch offices:
Al Alsa Street
Al Dahna Center
First Floor
P.O. Box 7188
Riyadh

Haji Abdullah Alireza Building
King Khaled Street
P.O. Box 3969
Damman

33, Mohammed Hassan Awad Street
P.O. Box 5978
Jeddah

SINGAPORE, TAIWAN, MYANMAR, BRUNEI
Information Publications Private, Ltd.
02-06 1st Fl., Pei-Fu Industrial Bldg.
24 New Industrial Road
Singapore 1953

SOUTH AFRICA, BOTSWANA
For single titles:
Oxford University Press Southern Africa
P O Box 1141
Cape Town 8000

For subscription orders:
International Subscription Service
P.O. Box 41095
Craighall
Johannesburg 2024

SPAIN
Mundi-Prensa Libros, S.A.
Castello 37
28001 Madrid

Librería Internacional AEDOS
Consell de Cent, 391
08009 Barcelona

SRI LANKA AND THE MALDIVES
Lake House Bookshop
P.O. Box 244
100, Sir Chittampalam A. Gardiner Mawatha
Colombo 2

SWEDEN
For single titles:
Fritzes Fackboksforetaget
Regeringsgatan 12, Box 16356
S-103 27 Stockholm

For subscription orders:
Wennergren-Williams AB
Box 30004
S-104 25 Stockholm

SWITZERLAND
For single titles:
Librairie Payot
6, rue Grenus
Case postal 381
CH 1211 Geneva 11

For subscription orders:
Librairie Payot
Service des Abonnements
Case postal 3312
CH 1002 Lausanne

TANZANIA
Oxford University Press
P O. Box 5299
Dar es Salaam

THAILAND
Central Department Store
306 Silom Road
Bangkok

TRINIDAD & TOBAGO, ANTIGUA BARBUDA, BARBADOS, DOMINICA, GRENADA, GUYANA, JAMAICA, MONTSERRAT, ST. KITTS & NEVIS, ST. LUCIA, ST. VINCENT & GRENADINES
Systematics Studies Unit
#9 Watts Street
Curepe
Trinidad, West Indies

TURKEY
Haset Kitapevi, A.S.
Istiklal Caddesi No. 469
Beyoglu
Istanbul

UGANDA
Uganda Bookshop
P.O. Box 7145
Kampala

UNITED ARAB EMIRATES
MEMRB Gulf Co.
P O Box 6097
Sharjah

UNITED KINGDOM
Microinfo Ltd.
P O Box 3
Alton, Hampshire GU34 2PG
England

URUGUAY
Instituto Nacional del Libro
San Jose 1116
Montevideo

VENEZUELA
Libreria del Este
Aptdo 60.337
Caracas 1060-A

YUGOSLAVIA
Jugoslovenska Knjiga
P O. Box 36
Trg Republike
YU-11000 Belgrade

RECENT WORLD BANK TECHNICAL PAPERS *(continued)*

No. 30 *Recycling from Municipal Refuse: A State-of-the-Art Review and Annotated Bibliography*

No. 31 *Remanufacturing: The Experience of the United States and Implications for Developing Countries*

No. 32 *World Refinery Industry: Need for Restructuring*

No. 33 *Guidelines for Calculating Financial and Economic Rates of Return for DFC Projects* (also in French, 33F and Spanish, 33S)

No. 34 *Energy Efficiency in the Pulp and Paper Industry with Emphasis on Developing Countries*

No. 35 *Potential for Energy Efficiency in the Fertilizer Industry*

No. 36 *Aquaculture: A Component of Low Cost Sanitation Technology*

No. 37 *Municipal Waste Processing in Europe: A Status Report on Selected Materials and Energy Recovery Projects*

No. 38 *Bulk Shipping and Terminal Logistics*

No. 39 *Cocoa Production: Present Constraints and Priorities for Research*No. 40 *Irrigation Design and Management: Experience in Thailand*

No. 40 *Irrigation Design and Management: Experience in Thailand*

No. 41 *Fuel Peat in Developing Countries*

No. 42 *Administrative and Operational Procedures for Programs for Sites and Services and Area Upgrading*

No. 43 *Farming Systems Research: A Review*

No. 44 *Animal Health Services in Sub-Saharan Africa: Alternative Approaches* (also in French, 44F)

No. 45 *The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements*

Banque mondiale

Siège
1818 H Street, N.W.
Washington, D.C. 20433, U.S.A.

Téléphone : (202) 477-1234
Facsimile : (202) 477-6391
Télex : WUI 64145 WORLDBANK
RCA 248423 WORLDBK
Adresse télégraphique : INTBAFRAD
WASHINGTONDC

Bureau européen
66, avenue d'Iéna
75116 Paris, France

Téléphone : (1) 47.23.54.21
Facsimile : (1) 47.20.19.66
Télex : 842-620628

Bureau de Tokyo
Kokusai Building
1-1 Marunouchi 3-chome
Chiyoda-ku, Tokyo 100, Japon

Téléphone : (03) 214-5001
Facsimile : (03) 214-3657
Télex : 781-26838



ISBN 0-8213-1618-4